

SCHLUSSBERICHT

**KMU-innovativ – Verbundprojekt Crash-Topo:
Methodische und softwaretechnische Umsetzung der
Topologieoptimierung crash-beanspruchter
Fahrzeugstrukturen**



Bewilligungszeitraum: 01.11.2010 – 31.01.2013

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IS10053A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurze Darstellung	4
I.1	Aufgabenstellung.....	4
I.1.1	Motivation	4
I.1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
I.1.3	Ziele	5
I.2	Planung und Ablauf	6
I.3	Wissenschaftlicher und technischer Stand vor dem Projekt	10
I.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
II.	Eingehende Darstellung	12
II.1	Wissenschaftlich - technische Ergebnisse – allgemein	12
II.1.1	Wissenschaftlich - technische Ergebnisse - asc(s)	14
II.1.2	Wissenschaftlich - technische Ergebnisse - DYNAmore	33
II.1.3	Wissenschaftlich - technische Ergebnisse – SFE (1. Teil).....	63
II.1.4	Wissenschaftlich - technische Ergebnisse - HAW Hamburg.....	73
II.1.5	Wissenschaftlich - technische Ergebnisse – SFE (2. Teil).....	122
II.2	Nachweis	132
II.2.1	Nachweis asc(s).....	132
II.2.2	Nachweis SFE.....	133
II.2.3	Nachweis DYNAmore.....	134
II.2.4	Nachweis HAW Hamburg	135
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten	136
II.3.1	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten asc(s).....	136
II.3.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten SFE	136
II.3.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten DYNAmore.....	137

II.3.4	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten HAW Hamburg	138
II.4	Verwertbarkeit	138
II.4.1	Verwertung asc(s).....	138
II.4.2	Verwertung SFE	139
II.4.3	Verwertung DYNAmore.....	141
II.4.4	Verwertung HAW Hamburg	142
II.5	Fortschritte bei anderen Stellen.....	142
II.6	Im Wesentlichen verwendete Literatur	143
II.7	Veröffentlichungen.....	147

Projektpartner:

Förderkennzeichen:

Automotive Simulation Center Stuttgart e. V. – asc(s e.V.)

Prof. Dr.-Ing. Erich Schelkle (Geschäftsführer)
Dipl.-Ing. Alexander Frederic Walser (Project Manager)
Nobelstraße 15
70569 Stuttgart-Vaihingen

01IS10053A

SFE GmbH

Dipl.-Ing. Hans Zimmer (President and CEO)
M.Eng. Michel Schäfer
Prof. Fabian Duddeck TUM in Kooperation mit SFE
Voltastr. 5
13355 Berlin

01IS10053B

DYNAmore GmbH

Dr.-Ing. Heiner Müllerschön
Dr.-Ing. Andrea Erhart
Dipl.-Ing. Peter Schumacher
Industriestr. 2
70565 Stuttgart-Vaihingen

01IS10053C

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW)

Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
Prof. Dr.-Ing. Axel Schumacher
Christopher Ortmann M.Sc.
Berliner Tor 9
20099 Hamburg

01IS10053D

I. Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

I.1.1 Motivation

Die virtuelle Craschauslegung von Fahrzeugkarosserien ist zentraler Bestandteil des Fahrzeugentwicklungsprozesses (FEP). Durch strengere gesetzliche Anforderungen, wachsende Kundenwünsche und den Einsatz neuer Materialkombinationen ist die Automobilindustrie heutzutage wie kaum zuvor betroffen von Innovationsdruck. Neben antriebstechnischen Maßnahmen zur Reduktion von CO₂-Emissionen sind vor allem Verbesserungen im Bereich des Leichtbaus gefragt, siehe Abbildung I.1.1.1.



Quelle: FAT (2007) Dr. Goede, Dr. Oppermann, Prof. Schelkle

Abbildung I.1.1.1: Fahrzeugleichtbau in seinen verschiedenen Ausprägungen

Geringe Fahrzeugmassen stehen in direktem Zusammenhang zum Verbrauch und damit zur CO₂-Belastung. Zur Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit beim Fahrzeugleichtbau sind neue virtuelle Entwicklungsmethoden unabdingbar. Hier können neue Softwarelösungen der KMUs einen entscheidenden Beitrag leisten.

I.1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Neben den etablierten Verfahren zur Parameter- und Formoptimierung muss die methodische Lücke bei der nichtlinearen Topologieoptimierung geschlossen werden, damit auch neue Strukturtopologien automatisiert abgeleitet werden können. Im Bereich der Crashesimulation sind hierzu in den letzten Jahren vor allem die Finite-Element-Methoden (FEM) so weit ausgereift, dass verwertbare Prognosen zum Crashverhalten von Fahrzeugstrukturen durchgeführt werden können. Entsprechende Simulationen werden mit kommerzieller Software auf Höchstleistungsrechnern (Clustersysteme) im Parallelbetrieb durchgeführt. Während die Topologieoptimierung im Bereich von linear statisch belasteten Strukturen zur Konzeptfindung bereits industriell etabliert ist, werden bei der Berücksichtigung von Crashlastfällen i.d.R. nur Wanddicken und CAD-Parameter optimiert (Schumacher 2005). Formänderungen können dank implizit parametrisch aufgebauter Geometrien – wie z.B. in SFE CONCEPT - in den Optimierungsprozess einbezogen werden (Zimmer et.al. 2009, Zimmer 2013). Der Prozess von Geometrieerstellung inklusive integrierte Vernetzung bis zur FE-Simulation kann vollautomatisch durchgeführt werden (Zimmer 2012).

I.1.3 Ziele

Ziel ist die Entwicklung eines industriell einsatzfähigen Verfahrens zur Form- und Topologieoptimierung der Querschnitte von Strangpressprofilen unter Berücksichtigung von Crash-Lastfällen. Die Querschnitte dieser Profile werden sehr zeitaufwendig, oft mit einfachen Probierverfahren entwickelt. Eine numerische Optimierung der Topologie würde hier den Entwicklungsprozess deutlich beschleunigen, damit effizienter machen und zugleich oft zu völlig neuen und besseren Konzepten für Querschnittsgestaltungen und Leichtbauansätzen führen. Gerade im Hinblick auf Elektrofahrzeuge wird somit die Basis zur Gestaltung und Konstruktion von neuen Struktur- und Antriebskonzepten gelegt.

I.2 Planung und Ablauf

Der Projektablauf entspricht dem in Abbildung I.2.1 dargestellten Zeithorizont. Der um drei Monate verzögerte Beginn des Forschungsprojektes und die dreimonatige kostenneutrale Verlängerung sind ebenfalls enthalten.

Projektstart 01.02.2011										
Nr.	Zeitplan Halbjahr	1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Arbeitspaket 1-23 Arbeitsschritte aus Block A-E	Projektmonat	1-3 Nov-Jan	4-6 Feb-Apr	7-9 Mai-Jul	10-12 Aug-Okt	13-15 Nov-Jan	16-18 Feb-Apr	19-21 Mai-Jul	22-24 Aug-Okt	25-27 Nov-Jan
AP1:	Literaturstudien zur Vorbereitung der Topologie- und Formoptimierung									
A5.1	Gegenüberstellung derzeitiger Verfahren zur Topologieoptimierung von Trägerquerschnitten in Crashlastfällen (Literaturstudie)									
A5.2	Gegenüberstellung und Aufbereitung derzeitiger Verfahren zur Formoptimierung für Crashlastfälle und MDO (Literaturstudie)									
AP2:	Bereitstellung industrieller Anwendungsbeispiele									
A1.1	Vorgabe der Zielrichtung, Eingrenzung des Problembereichs, Einbringen von fahrzeugspezifischem Knowhow									
A1.3	Bereitstellung digitaler Prototypen (Use Cases), Definition der zugehörigen Querschnittsanforderungen und -charakteristiken							MS1		
AP3:	Verifikation der Berechnungsgüte der Crashsimulation									
A3.2	Validierung Berechnungsgüte der Crashmodelle, Konsolidierung der Substrukturmodelle (numerische Stabilität, Rechenzeiten, etc.)									MS3
AP4:	Generischer Musterkatalog (SFE CONCEPT) von Querschnittsvarianten (material, bauteil und lastfallspezifisch) mit hinterlegten Eigenschaften									
A2.1	Aufbau eines strukturierten Musterkatalogs, Charakterisierung der Querschnittsmuster und -anordnungen (basierend auf A1.2)									
A2.2	Erstellung der SFE-Modelle für den Musterkatalog (implizite Parametrisierung für die Optimierung)					MS2				
AP5:	Ermittlung zusätzlicher Restriktionen (Fertigung und andere Lastfälle)									
A1.2	Definition der Anforderungen (Lastfälle, Material, Bauweisen, Füge- und Fertigungstechnologien, relevante Komponenten, etc.)									
A4.1	Definition der Optimierungsaufgabe (Zielgrößen, Nebenbedingungen, Variablen, Designbereiche, etc.)									
A4.3	Definition der Nebenbedingungen zur Erfassung der Disziplinen, die nicht durch explizite Berechnungen berücksichtigt werden					MS4				

Projektstart 01.02.2011										
Nr.	Zeitplan Halbjahr	1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Arbeitspaket 1-23 Arbeitsschritte aus Block A-E	Projektmonat	1-3 Nov-Jan	4-6 Feb-Apr	7-9 Mai-Jul	10-12 Aug-Okt	13-15 Nov-Jan	16-18 Feb-Apr	19-21 Mai-Jul	22-24 Aug-Okt	25-27 Nov-Jan
AP6:	Verfahren zur Erstellung der Substrukturen (SFE CONCEPT) und Ersatzlastfällen									
A3.1	Definition der Substrukturen (SFE) für Optimierung isolierter Teilbereiche, Ableitung der zugehörigen Ersatzlastfälle									
AP7:	Abgrenzung Bau- und Designraum									
A4.2a	Definition des Bau- und Designraums (implizit parametrische Beschreibung)									
AP8:	Implizit parametrische Beschreibung des Bau- und Designraums, Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen und Bedingungen aus anderen Lastfällen									
A4.2b	Definition des Bau- und Designraums (implizit parametrische Beschreibung)									
D1.1	Erweiterung der für Formoptimierung des Gesamtfahrzeugs geeigneten Parametrisierung, ausgehend von Teil C									
AP9:	Interface zwischen der Bau- und Designraumbeschreibung und dem Ausgangsmodell der Vorooptimierung mittels ESLM und HCA									
B1.2	Interface zwischen parametrischer Bauraumbeschreibung (SFE) und ESLM/HCA-Methode zur Erzeugung der Ausgangstopologie									
AP10:	Prototypischer Aufbau der ESLM und HCA Methode für die Optimierung von Strangpressprofilen und Ermittlung des 3D Volumenmodells									
B1.1	Prototypischer Aufbau der ESLM- und HCA-Methode, Vorvalidierung					MS5				
AP11:	Durchführung der Vorooptimierung (ESLM, HCA) und Vergleich									
B2.1	Erzeugung der Ausgangstopologie und Durchführung der Vorooptimierung (ESLM, HCA), Bewertung und Vergleich							MS6		
AP12:	Verfahren zum Abgleich des Resultats aus der Vorooptimierung (3DVolumenmodell) mit dem Musterkatalog zur Identifizierung der Grundtopologie (3D-Schalenmodell)									
B2.2	Entwicklung eines Verfahrens zur Glättung der voroptimierten Topologie, Berücksichtigung der Fertigungsaspekte									
B3.1	Verfahren zum Transfer der voroptimierten Topologie (3D-Volumenmodell) in SFE (3D-Schalenmodell) via Musterkatalog									
B3.2	Validierung und Dokumentation der Ergebnisse der Vorooptimierung/ Glättung anhand des 3D-Schalenmodells									
AP13:	Verfahren zur Erzeugung des Graphenmodells aus dem 3D-Schalenmodell und vice versa; Berücksichtigung von zusätzlichen Fertigungsrestriktionen und Lastfallbedingungen (Kopplung GRAMB - SFE CONCEPT)									
C1.2a	Interface zwischen parametrischer Bauraumbeschreibung (SFE) und GRAMB-Methode zur Erzeugung der Graphentopologie									
C1.3	Validierung des Interfaces SFE-GRAMB-SFE, Abgleich der Parametrisierungen									

Projektstart 01.02.2011										
Nr.	Zeitplan Halbjahr	1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Arbeitspaket 1-23 Arbeitsschritte aus Block A-E	Projektmonat	1-3 Nov-Jan	4-6 Feb-Apr	7-9 Mai-Jul	10-12 Aug-Okt	13-15 Nov-Jan	16-18 Feb-Apr	19-21 Mai-Jul	22-24 Aug-Okt	25-27 Nov-Jan
AP14:	Anpassung der Software GRAMB zur Anwendung auf Karosseriekomponenten (z. B. Erweiterung auf Schalenelemente)									
C1.1	Anpassung der Software GRAMB zur Anwendung auf Karosseriekomponenten, Erweiterung auf 3D-Schalenelemente				MS7					
AP15:	Heuristische Regeln zur Verbesserung des Strukturverhaltens und Implementierung in GRAMB									
C2.1a	Entwurf und Validierung heuristischer Regeln zur Verbesserung der Performance von GRAMB									
AP16:	Testen der Effizienz und Aussagegüte der heuristischen Regeln; Untersuchung von hybriden Ansätzen bzgl. Ergebnisqualität und Effizienz.									
C2.1b	Entwurf und Validierung heuristischer Regeln zur Verbesserung der Performance von GRAMB									
AP17:	Verfahren zur automatischen Erzeugung des Formoptimierungsmodells (SFE CONCEPT) aus dem Ergebnis der GRAMB-Optimierung									
C1.2b	Interface zwischen parametrischer Bauraumbeschreibung (SFE) und GRAMB-Methode zur Erzeugung der Graphentopologie									
AP18:	Durchführung der Topologie- und Formoptimierung mit GRAMB									
C3.1	Durchführung der Topologie- u. Formoptimierung mittels GRAMB, Validierung d. Ergebnisse anhand nichtlinearer Crashberechnungen									MS8
AP19:	Anpassung der bisherigen Formoptimierungstools an die gekoppelte Topologie-Formoptimierung									
D1.2	Anpassung existierender Formoptimierungsverfahren an die vorliegende gekoppelte Topologie-Formoptimierung									
AP20:	Durchführung der Formoptimierung am Gesamtfahrzeugmodell mit LS-OPT									
D1.3	Verbesserung der numerischen Effizienz der existierenden Formoptimierungsverfahren							MS9		
D2.1	Einbettung der Substrukturen aus C3.1 in den Kontext des Gesamtfahrzeugs, Validierung der Modelle									
D3.1	Durchführung der Formoptimierungen am komplexen Fahrzeugmodell und Validierung									MS10
AP21:	Erstellung eines Demonstrators, Gesamtvalidierung des Konzepts Voroptimierung (ESLM, HCA) – Topologieoptimierung (GRAMB) – Formoptimierung (SFE CONCEPT)									
E2.3	Durchführung eines praxisnahen Validierungsbeispiels, Ableitung von Verbesserungsvorschlägen und zukünftigen Projekten									MS11

Projektstart 01.02.2011										
Nr.	Zeitplan Halbjahr	1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Arbeitspaket 1-23 Arbeitsschritte aus Block A-E	Projektmonat	1-3 Nov-Jan	4-6 Feb-Apr	7-9 Mai-Jul	10-12 Aug-Okt	13-15 Nov-Jan	16-18 Feb-Apr	19-21 Mai-Jul	22-24 Aug-Okt	25-27 Nov-Jan
AP22:	Dokumentation und kritische Wertung inklusive betreffs Transfer zu anderen Aufgabenstellungen									
E2.1	Test und Validierung der Methodologien in Teilbereichen									
E2.2	Gesamtvalidierung, Dokumentation und Auswertung									
E3.1	Überprüfung Übertragbarkeit des Vorgehens auf Strukturbau-gruppen und Gesamtfahrzeug									
E4.1	Projektreview, Überprüfung der Zielerreichung									
AP23:	Koordination									
E1.1	Projektkoordination, Monitoring und Kommunikation									
E1.2	Organisation von Treffen der Partner, Workshops, etc.									
E4.2	Projektkoordination, Öffentlichkeitsarbeit, Publikationen zum Projekt									

Meilenstein	Beschreibung	Zeitplan
MS1	Bereitstellung digitaler Prototypen	19. Monat
MS2	Bereitstellung des Musterkatalogs inklusive der SFE-Modellierungen	15. Monat
MS3	Bereitstellung der validierten Substrukturen für die einzelnen Lastfälle	26. Monat
MS4	Abschluss der Vorbereitung der Optimierungsaufgaben	15. Monat
MS5	Prototypische Implementierung der ESLM- und HCA-Methoden (Topologie)	15. Monat
MS6	Abschluss der ESLM/HCA Topologieoptimierung	21. Monat
MS7	Bereitstellung der angepassten GRAMB-Software	12. Monat
MS8	Abschluss der GRAMB-Optimierung (Topologie und Form, Substrukturen)	27. Monat
MS9	Abschluss der Aufbereitung von Formoptimierungsmethoden (Gesamtfahrzeug)	21. Monat
MS10	Abschluss der Formoptimierungen (Kontext des Gesamtfahrzeugs)	27. Monat
MS11	Abschluss der Gesamtvalidierung der Entwicklungen	27. Monat

Abbildung I.2.1: Vollzogener Arbeitsplan des Verbundprojektes

I.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor dem Projekt

Die Ausführungen in diesem Absatz stammen aus (Ortmann und Schumacher 2012). Die Besonderheiten von Crashproblemen erschweren den Einsatz von Optimierungsverfahren im Allgemeinen und verhindern den Einsatz von aus der linearen Statik bekannten Topologieoptimierungsmethoden, wie z.B. der *Homogenisierungsmethode* (Bendsøe und Kikuchi 1988). Zu diesen Besonderheiten zählen: Kontakt, große Deformationen und Rotationen, große Starrkörperbewegungen, nichtlineares und geschwindigkeitsabhängiges Materialverhalten, Verwendung von Materialversagensmodellen, nicht-glatte Strukturantworten und numerische sowie physikalische Verzweigungspunkte. Die bei Crashproblemen zahlreich auftretenden Nichtlinearitäten haben ebenfalls auf den Aspekt der Robustheit großen Einfluss (Schumacher und Olschinka 2008). Auch die Auslegung von Bauteilen nach den Kriterien der Fahrzeugsicherheit stellt besondere Anforderungen an Optimierungsprozeduren. Es werden spezielle Optimierungsfunktionale verwendet, wie z.B. Kriterien für die Bewertung des Risikos von beschleunigungsbasierten Kopfverletzungen (*Head Injury Criterion - HIC*). Aber auch die gegensätzlichen Auslegungsziele der Steifigkeit für strukturelle Integrität und der Nachgiebigkeit für geringe Beschleunigungen stellen Ingenieure und Optimierungsalgorithmen vor Herausforderungen. In den letzten Jahren sind verstärkt Anstrengungen unternommen worden, um Verfahren für die kombinierte Topologie- und Gestaltoptimierung von crashbelasteten Strukturen zu entwickeln. Zwei prominente Vertreter dieser neuen Methoden sind die *Hybrid Cellular Automaton (HCA)* - Methode (Patel et. al. 2009) und die *Equivalent Static Loads Method (ESLM)* (Park 2011).

I.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die erfolgreiche und zielführende Projektbearbeitung konnte das Konsortium auf weitere Experten zurückgreifen. Während der gesamten Projektlaufzeit wurde das Vorhaben von Prof. Dr.-Ing. Fabian Duddeck von der TU München als Kooperationspartner der SFE GmbH begleitet. Über einen Unterauftrag des asc(s) an die VW Osnabrück GmbH wurde ein industrielles Anwendungsbeispiel und weiteres Expertenwissen in das Projekt eingebracht. Weitere Unterstützung kam von den assoziierten Projektpartnern, die als Berater und Inputgeber während der Projektlaufzeit agierten. Hierzu zählen die drei OEMs

- Adam Opel AG
- Daimler AG
- Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

sowie die Strangpressprofilhersteller

- Benteler Aluminium Systems Norway AS
- Constellium Singen GmbH

Des Weiteren zu erwähnen ist die Beteiligung der AUDI AG an vereinzelt Arbeitskreissitzungen. Nachfolgend sind weitergehende Punkte aufgeführt, die den Aufbau und die Zusammenarbeit innerhalb des Projektes erkennen lassen:

- Projektkoordination asc(s)
- Software von DYNAmore und SFE: Verwendung von allen Projektpartnern
- Softwaresupport von DYNAmore und SFE
- Softwaresupport von LSTC (HCA) (Livermore Software Technology Cooperation, US Livermore)
- Softwaresupport von VRAND (Genesis/ESL) (Vanderplaats Research & Development, Inc., Colorado Springs)
- Unterstützung von DYNAmore beim Aufbau der Anwendungsbeispiele
- Unterstützung von SFE beim Aufbau der vollparametrischen Modelle
- Unterstützung von TUM in Kooperation mit SFE

- Unterstützung von VW-OS beim Aufbau eines industriellen Anwendungsbeispiels
- Unterstützung von VW-OS bei Definition des Optimierungsproblems eines industriellen Anwendungsbeispiels
- Bereitstellung eines aufbereiteten industriellen Anwendungsbeispiels der Daimler AG
- Zusammenarbeit mit dem Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart - HLRS
- Fragenkatalog: Projektpartner + assoziierte Partner + Strangpressprofilhersteller
- Entstehung der Heuristiken durch Workshops mit Crasheexperten der (assoziierten) Partner (Adam Opel AG, Audi AG, Daimler AG, Dr.-Ing. h.c. F. Porsche, Benteler Aluminium Systems Norway AS, Constellium Singen GmbH)
- Werksbesichtigung / Workshop Benteler Aluminium Systems Norway AS
- Werksbesichtigung / Workshop Constellium Singen GmbH

II. Eingehende Darstellung

II.1 Wissenschaftlich - technische Ergebnisse – allgemein

Im Projektvorhaben wurde eine dreistufige Prozesskette zur Form- und Topologieoptimierung von crashbeanspruchten Strangpressprofilen erarbeitet (siehe Abbildung II.1.1). Der modulare Aufbau erlaubt es, die Software-Tools getrennt voneinander zu benutzen und über entsprechende Schnittstellen mit weiteren Programmanwendungen zu koppeln. Hierzu wurden entsprechende Schnittstellen geschaffen. Dies gewährleistet eine vielfältige und breite Anwendung im industriellen Einsatz. Zudem wurden in Zusammenarbeit mit dem Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS) die notwendigen Anpassungen für den Betrieb auf HPC-Cluster-Systemen vorgenommen.

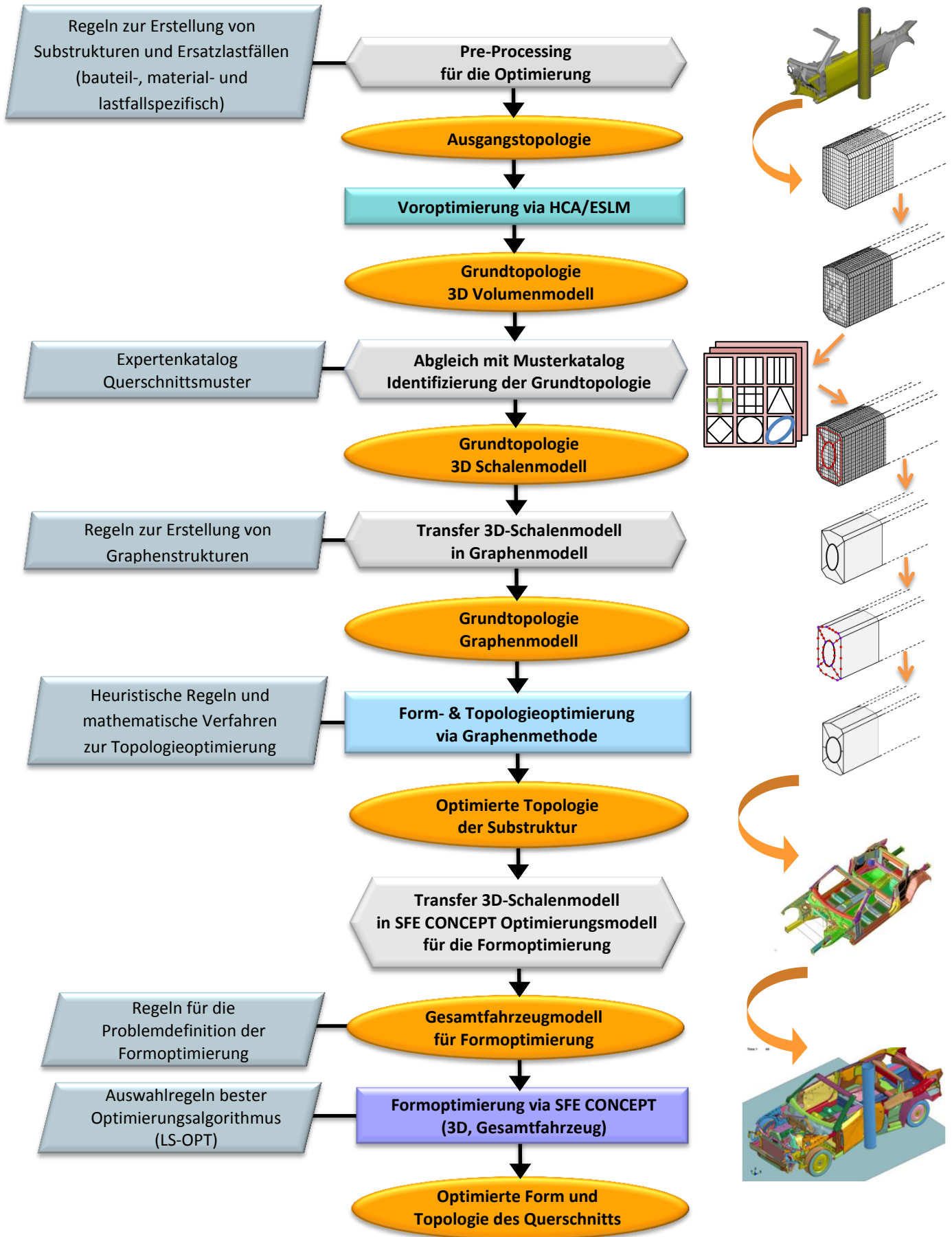


Abbildung II.1.1: Modulare Prozesskette zur Form- und Topologieoptimierung von Strangpressprofilen

Als Ausgangsbasis für die Prozesskette wurden Arbeiten im Bereich des Pre-Processing unternommen (asc(s) und SFE). Für die Reduzierung der Rechenzeiten wurde die Verwendung von Substrukturen, welche das zu optimierende Bauteil enthalten, untersucht (siehe Abschnitt II.1.1 Substruktur-Methode). Diese können z.B. für die erste Stufe der Prozesskette – die Voroptimierung - verwendet werden. Hierzu wurden von DYNAmore zwei alternative Methoden (HCA – Hybrid Cellular Automata und ESLM – Equivalent Static Load Method) betrachtet. Die Ergebnisse der beiden Methoden geben eine erste Idee für eine optimale Struktur und dienen als Ausgangspunkt weiterer Optimierungsschritte. Über eine Mustererkennung des Querschnittes via SFE CONCEPT (Abschnitt II.1.3) gelangt man zum zweiten Optimierungsschritt. Hierbei wird die Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung (GHT) der HAW Hamburg angewendet (siehe Abschnitt II.1.4). Der somit optimierte Querschnitt des Strangpressprofils kann in der dritten Stufe – der Formoptimierung via SFE CONCEPT – im Kontext des Gesamtfahrzeuges betrachtet werden (Abschnitt II.1.5).

Die nachfolgenden Abschnitte geben einen detaillierteren Einblick in die Projektarbeiten sowie die entwickelten und getesteten Methoden.

II.1.1 Wissenschaftlich - technische Ergebnisse - asc(s)

Abgrenzung des Problembereichs

Nach eingehender Analyse der zu entwickelnden Optimierungsverfahren und der zu optimierenden Bauteilgeometrie haben sich die Projektpartner auf die simulationsbasierte Form- und Topologieoptimierung von crashbeanspruchten Strangpressprofilen geeinigt. Dieses Vorgehen bietet die Möglichkeit die Komplexität der Optimierungsaufgabe stufenweise zu erhöhen. Strangpressprofile können innerhalb der Fahrzeugstruktur als in ihrer Längsrichtung gerade Bauteile eingesetzt werden. Wenn es die Fahrzeuggeometrie erfordert sind auch Krümmungsradien über die Bauteillänge möglich. Der Querschnitt ist dabei fertigungsbedingt über die Bauteillänge konstant. Durch nachträgliche Bearbeitung (z.B. Verprägen, Stanzen, etc.) kann der Querschnitt entsprechend angepasst werden. Somit kann als einfachste Optimierungsaufgabe die Form und Topologie des Querschnitts, welcher in Auszugsrichtung konstant ist, betrachtet werden. Durch Krümmungsradien und Aussparungen in

Auszugsrichtung wird die Komplexität erhöht. Dies endet in veränderlichen Querschnitten z.B. durch Änderungen in der Kontur oder das Einbringen von Verstärkungsprofilen (3-dimensionale Optimierungsaufgabe).

Definition der Anforderungen

Um die Anforderungen an die Optimierungs- und Simulationstools möglichst frühzeitig abzusichern, wurde ein umfangreicher Fragenkatalog mit 57 Fragen erstellt. Dieser wurde an die jeweiligen Experten bei den OEMs und Strangpressprofilherstellern gerichtet. Somit konnte eine umfangreiche Wissensbasis bzgl. Material, Fertigung, Querschnittsmuster und Anordnung, Fügetechnik, Bau- und Designraum sowie Berechnung und Simulation von Strangpressprofilen aufgebaut werden. Zudem wurden Workshops mit Experten vor Ort durchgeführt (siehe I.4).

Für die Definition des zu optimierenden Bauteils wurde der Einsatzbereich von Strangpressprofilen geprüft. Es zeigt sich eine vielfältige Bandbreite innerhalb der Rohbaustruktur z.B. als Space-Frame-Bauweise oder für Rahmen und Unterbodenstrukturen. Mögliche Einsatzbereiche crashbeanspruchter Profile sind: Crash-Management-Systeme, (Bumper und Crashbox), Schweller, Längsträger I und II, Sitzquerträger, Dachrahmen, A- und B-Säule, Scheibenquerträger, Cockpit-Querträger, Tunnelbrücken, Türaufprallträger, Motor-Integralträger, Querträger, Domstreben, Federbeinstreben, Hinterachsträger, Überrollsysteme, etc. . Die Abbildungen II.1.1.1 und II.1.1.2 zeigen beispielhaft den vielfältigen Einsatzbereich von Strangpressprofilen innerhalb zweier Fahrzeugkarosserien.

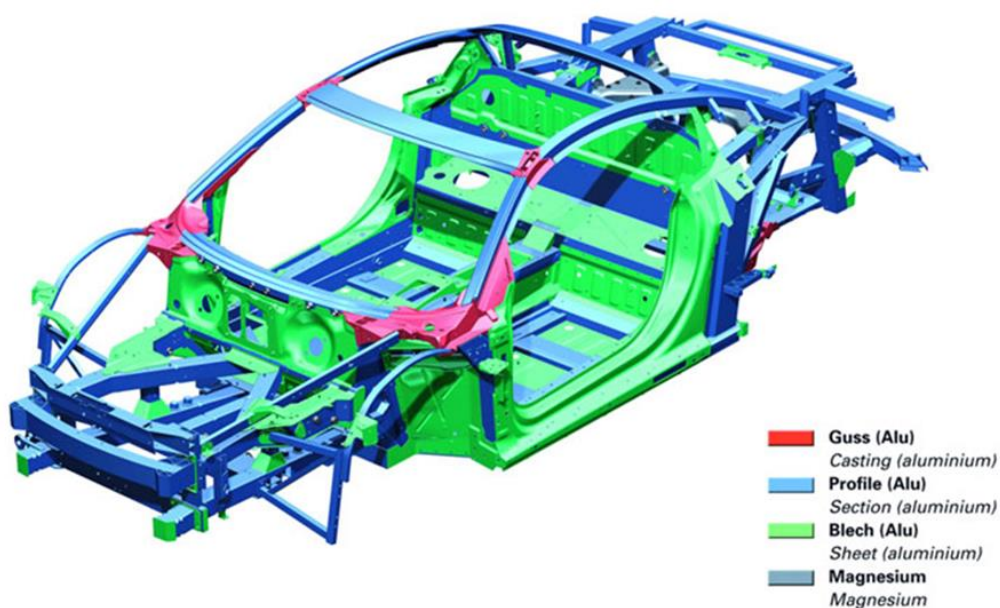


Abbildung II.1.1.1: Rohbaukarosserie Audi R8 – 2008 (Quelle: Audi)

**Gewichtsoptimierter Materialmix:
Verwindungssteife Struktur mit nur
241 Kilogramm Gewicht**

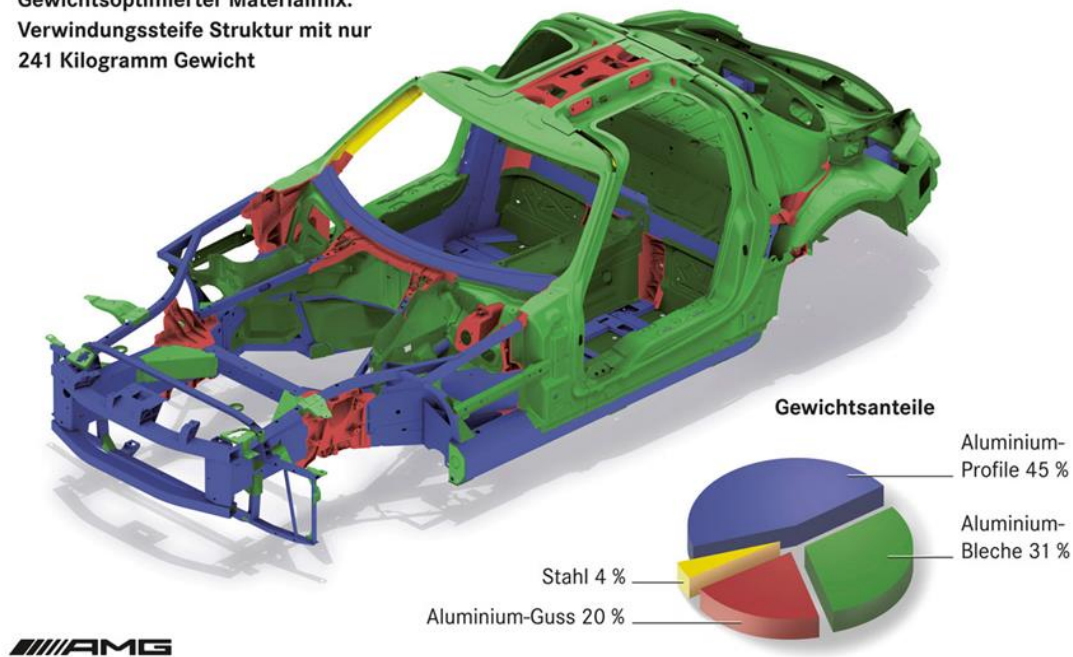


Abbildung II.1.1.2: Rohbaukarosserie Mercedes SLS AMG (Quelle: Daimler)

Für das Projektvorhaben wurde als zu optimierendes Bauteil der Fahrzeugschweller ausgewählt. Dieser unterliegt verschiedensten Craschanforderungen und trägt maßgeblich zum Energieabbau bei. Nähere Informationen zu den Crash-Lastfällen finden sich im nachfolgenden Abschnitt *Industrielle Anwendungsbeispiele*.

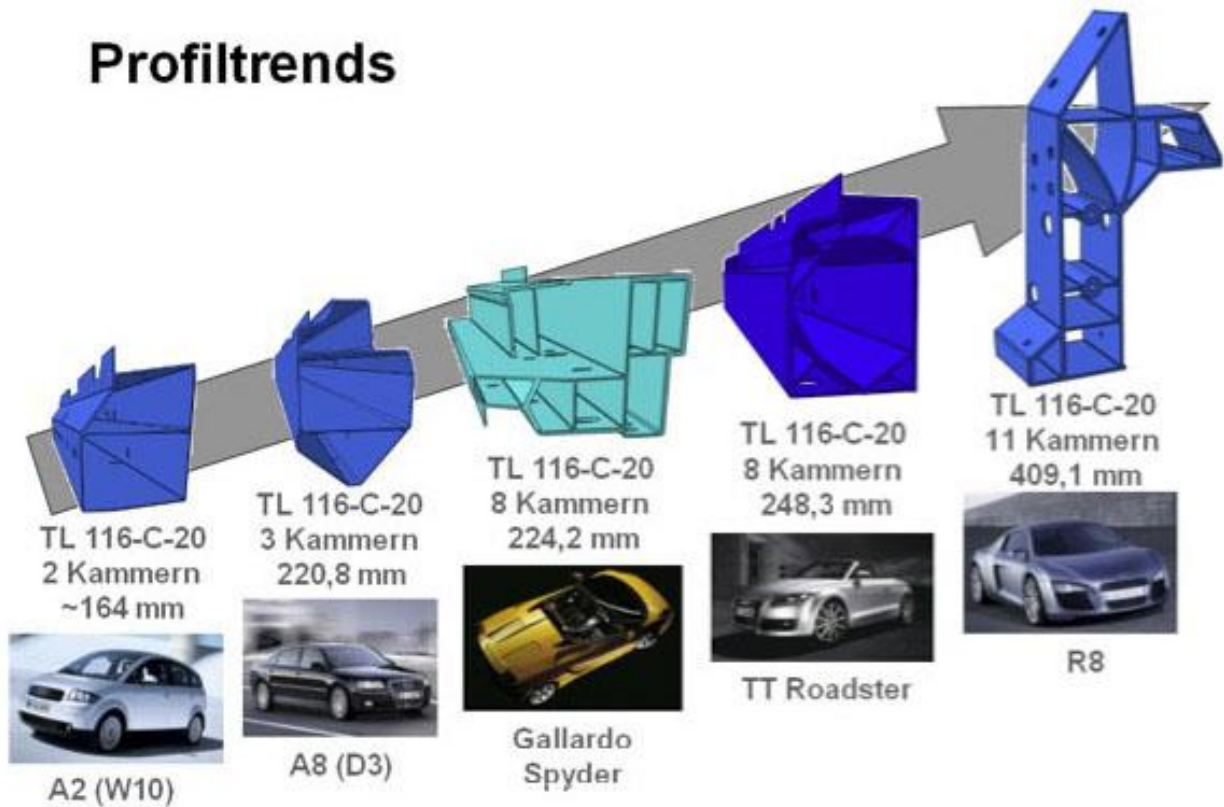
Strangpressprofile bilden vor allem bei Stückzahlen bis ca. 40.000 Fahrzeuge pro Jahr eine sehr gute Alternative zu Blechbauweisen. Sie bestehen i.d.R. aus Aluminiumlegierungen in verschiedenen Festigkeitsklassen mit einer Streckgrenze von 200 – 500 N/mm² und verschiedenen Legierungsanteilen (6xxx - Hauptlegierungselement: Magnesium und Silicium, 7xxx – Hauptlegierungselement: Zink). Die Werkstoffauswahl hängt von vielen Faktoren einschließlich der Festigkeit, Dehnbarkeit, Umformbarkeitsanforderungen, Montagekonzepten, Kosten- und Gesamtrestrictionen ab.

Auch fertigungsbedingt gibt es einige Restriktionen, welche als Anforderungen für die Softwaretools identifiziert wurden. So können aus den minimalen und maximalen Wanddicken Modellierungsvorschriften für das FE-Modell abgeleitet werden (siehe *Notwendige Netzfeinheit* II.1.2). Die Integration von Fertigungsrestriktionen in den Optimierungsablauf sorgt dafür, dass das Ergebnis in Form eines optimalen Designvorschlags auch produktionstechnisch umgesetzt

werden kann. Entsprechende Parameter können in der Optimierungsprozedur in Form von frei definierbaren Variablen (z.B. Ober- und Untergrenzen) berücksichtigt werden. Dieses Vorgehen ist jedoch programmtechnisch nicht in allen Optimierungsstrategien umsetzbar. Jedoch bietet sich insbesondere bei der Graphen- und Heuristik-basierten Form- und Topologieoptimierung (siehe II.1.4) die Möglichkeit, gewisse Parameter zu berücksichtigen. Im Hinblick auf den Profilquerschnitt sind dies neben den minimalen und maximalen Wanddicken auch Mindestabstände, minimale Verbindungswinkel zwischen Wänden und eine Maximalanzahl von miteinander verbundenen Wänden an Verbindungsstellen. Somit kann bereits bei der prototypischen Software durch Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen der Designbereich effektiv eingegrenzt werden.

Charakterisierung von Querschnittsmustern und Querschnittsanordnungen - Musterkatalog

Für die Identifizierung von Grundtopologien (Mustererkennung) und den implizit-parametrischen Aufbau der Profilquerschnitte in SFE CONCEPT wurden aktuelle und zukünftige Querschnittsvarianten analysiert. Hierzu wurde auf Informationen der assoziierten Partner zurückgegriffen sowie eine umfangreiche Bildsammlung von Profilquerschnitten und Rohbaukarosserien zusammengetragen. Abbildung II.1.1.3 zeigt die Profiltrends bei Audi. Beginnend bei einfachen Zwei-Kammer-Profilen ist ein Trend zu deutlich mehr Kammern und funktionsintegrierenden Eigenschaften zu identifizieren. Um jedoch wirtschaftlich zu bleiben dürfen die Profilquerschnitte nicht allzu komplex ausgestaltet werden. Die Überlagerung von einfachen geometrischen Grundformen ermöglicht durch den implizit-parametrischen Aufbau in SFE CONCEPT eine flexible Querschnittsgestaltung, wie sie von SFE in diesem Projektvorhaben auf Basis der gelieferten Informationen programmtechnisch umgesetzt wurde (siehe II.1.3).

Abbildung II.1.1.3: Profiltrends bei Audi (Quelle: www.leichtbau.de)

Industrielle Anwendungsbeispiele

Von den beiden OEMs VW-Osnabrück GmbH und Daimler AG wurden nach entsprechenden Geheimhaltungsvereinbarungen jeweils ein LS-DYNA Finite-Elemente-Rohbaumodell den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Diese dienen zur Validierung der Optimierungsmethoden sowie als Grundlage für die Untersuchungen bzgl. der Verwendung von Substrukturen in den Optimierungsdurchläufen.

Beim Simulationsmodell von VW-Osnabrück handelt es sich um eine Cabrio-Rohbaukarosserie inkl. Fahrwerk, Motor, Getriebe, Kühler und Stoßfänger mit 580.000 Finiten-Elementen. A- und B-Säule sind auf den zu optimierenden Schweller aufgesetzt. Der Schweller wurde über ein separates Include-File einbezogen. Die Außenkontur wurde als Bau- bzw. Designraum definiert. Anhand von vier Crash-Lastfällen wurden die Werte auslegungsrelevanter Antwortgrößen aller Disziplinen als Restriktion definiert.

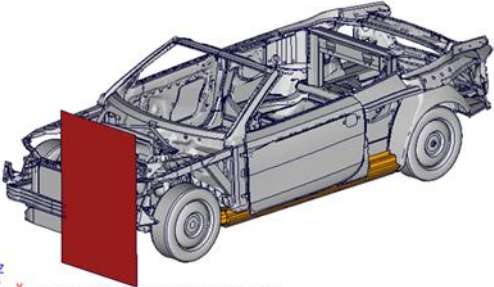
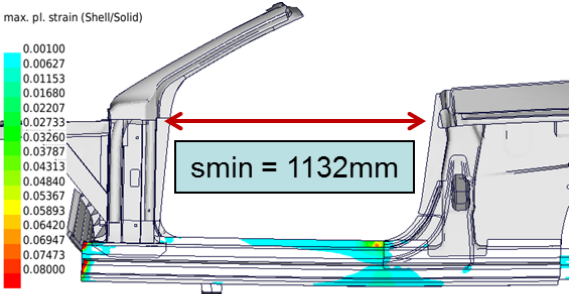
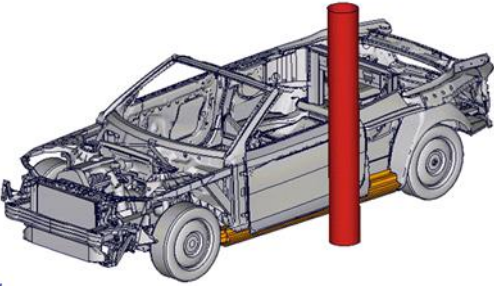
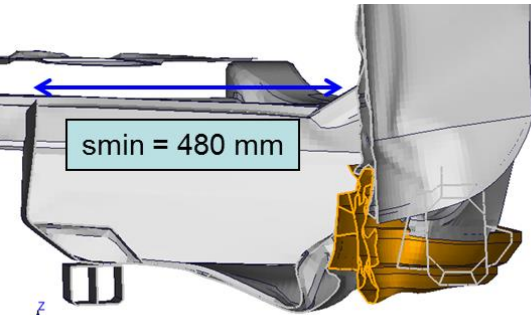
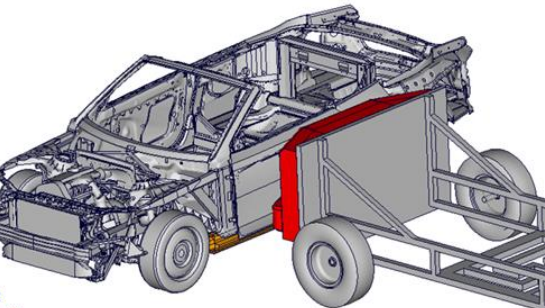
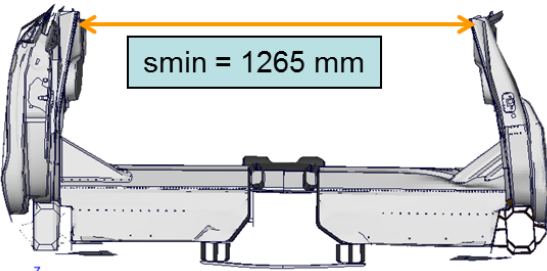
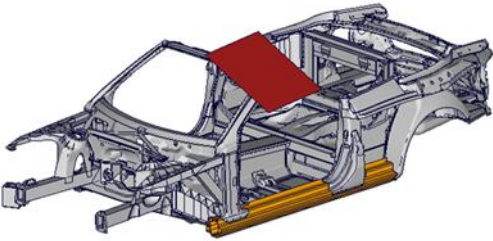
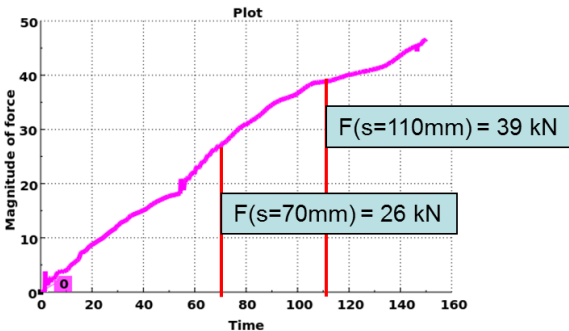
Simulationsmodell VW-Osnabrück	
<p>Crashlastfall</p>  <p>Slot 1: LF_front - State 1 at time 0.000000</p>	<p>Zielgröße</p>  <p>max. pl. strain (Shell/Solid)</p> <p>0.00100 0.00627 0.01153 0.01680 0.02207 0.02733 0.03260 0.03787 0.04313 0.04840 0.05367 0.05893 0.06420 0.06947 0.07473 0.08000</p> <p>smin = 1132mm</p> <p>Slot 1: LF_front - State 42 at time 100.000481</p>
<p>Frontcrash 40% starre Wand 64 km/h</p>  <p>Slot 0: LF_Pfahl - State 1 at time 0.000000</p>	<p>Türausschnittsreduktion</p>  <p>smin = 480 mm</p> <p>Slot 0: LF_Pfahl - State 42 at time 100.000481 Slot 2: dacheindrueckung - State 62 at time 15</p>
<p>Seitencrash starrer Pfahl (29 km/h)</p>  <p>Slot 0: LF_IHHS_Barr - State 1 at time 0.000000</p>	<p>Überlebensraum</p>  <p>smin = 1265 mm</p> <p>Slot 0: LF_IHHS_Barr - State 42 at time 100.000481</p>
<p>Seitencrash def. Barriere 50km/h</p>  <p>Slot 2: dacheindrueckung - State 1 at time 0.000000</p>	<p>B-Säulenintrusion</p>  <p>Plot</p> <p>Magnitude of force</p> <p>Time</p> <p>F(s=110mm) = 39 kN</p> <p>F(s=70mm) = 26 kN</p>
<p>Dacheindrückung</p>	<p>Kraftniveau</p>

Abbildung II.1.1.4: Crashlastfälle für die Querschnittsoptimierung des Schwellers am Modell von VW-Osnabrück

Im Lastfall Frontcrash ergibt sich für den Schweller ein lokales Knicken an der B-Säule sowie eine zwei-achsige Biegung. In Bezug auf den Referenzquerschnitt ist somit eine Verschlechterung des Türausschnittsreduktionswertes (ua) unzulässig. Die stärksten Deformationen erfährt der Schweller im Lastfall seitlicher Pfahl. Hieraus lässt sich als Zielgröße der Überlebensraum (ua) (Abstand zwischen Türinnenkante und Tunnel) definieren. Im Lastfall seitliche Barriere erfolgt die Krafteinleitung in den Schweller in erster Linie durch die B-Säulen-Rückverlagerung. Hier kann in Bezug auf den Referenzquerschnitt eine Verringerung des B-Säulenabstandes (ua) als unzulässig definiert werden. Für die Dacheindrückung kann eine Verschlechterung des Kraftniveaus bei 70 und 110 mm Eindrückweg (ua) als unzulässig erachtet werden.

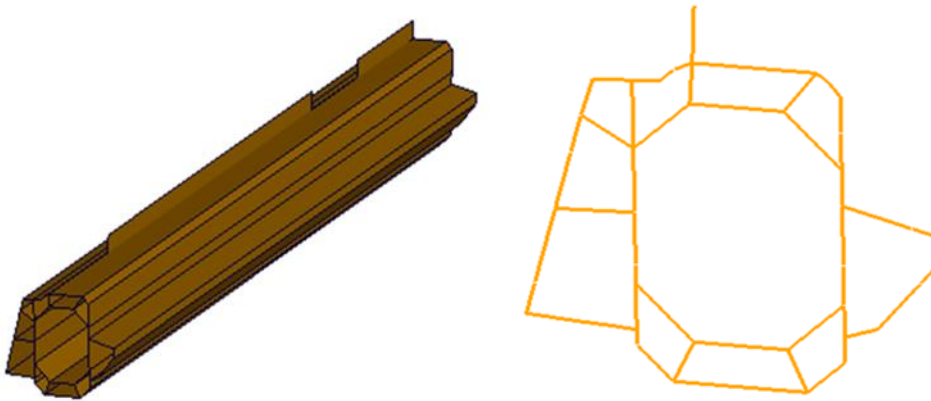


Abbildung II.1.1.5: Schweller (Extrusionsprofil) und Querschnittstopologie (Referenzquerschnitt)

Neben den Crashlastfällen ist zudem eine Verschlechterung der statischen Biege- und Torsionssteifigkeit unerwünscht.

Als weiteres industrielles Anwendungsbeispiel stand dem Projektkonsortium ein Rohbaumodell der Daimler AG zur Verfügung (siehe Abbildung II.1.1.5). Hierbei handelt es sich um ein reduziertes LS-DYNA Gesamtfahrzeugmodell (C197) ohne Kotflügel, Motorhaube, Heckdeckel, jedoch mit Türen, Integralträger, Cockpit-Querträger und Sitze. Für das reduzierte Modell wurden entsprechende Ersatzlastfälle definiert: seitlicher Pfahl, Seitenbarriere, Steifigkeit.

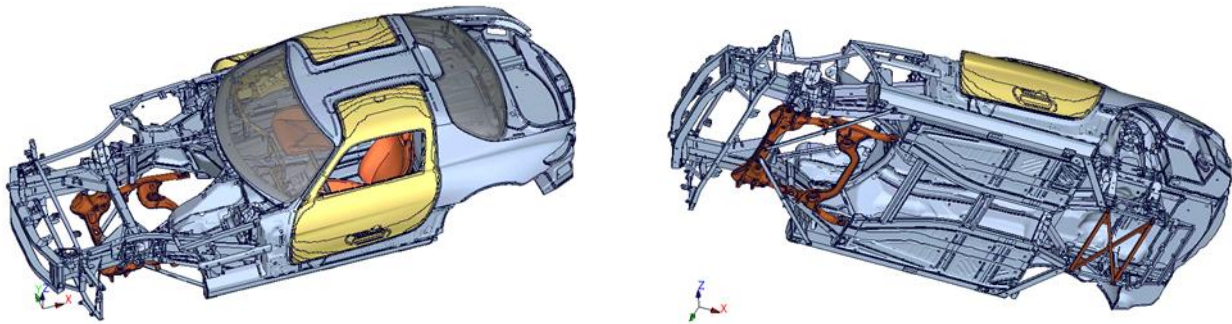


Abbildung II.1.1.5: Zur Verfügung gestelltes Rohbaumodell (C197 SLS AMG) der Daimler AG

Da die industriellen Anwendungsbeispiele erst zu einem relativ späten Zeitpunkt im Projekt zur Verfügung standen, konnten nur vereinzelte Crashlastfälle wie in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt betrachtet werden. Diese wurden jedoch im Hinblick auf eine industrielle Validierung der prototypischen Software ausgewählt und als repräsentativ eingestuft.

Substruktur-Methode

Da die Form- und Topologieoptimierung einzelner Strukturbauteile mit den hier beschriebenen Verfahren zu langen Antwortzeiten führen kann, wurden vom asc(s Untersuchungen bzgl. der Verwendung von Substrukturen (strukturelle Teilmodelle) gemacht. Substrukturen haben den Vorteil, dass sie im Vergleich zu Gesamtfahrzeugmodellen mit erheblich weniger Rechenzeit auskommen. Dies ist vor allem von Vorteil, wenn durch eine hohe Anzahl an Iterationen viele Crashberechnungen durchgeführt werden. Der Zeitgewinn, der sich bei der Optimierung ergibt, bildet sich aus der Reduzierung der Antwortzeiten durch die Verwendung von Substrukturen abzüglich der notwendigen Zeit für die Erstellung der Substrukturen.

$$\text{Zeitgewinn}_{\text{Optimierung}} = \text{Zeitgewinn}_{\text{Substruktur}} * n_{\text{Crashjobs}} - \text{Zeitaufwand}_{\text{Substruktur}}$$

Demgegenüber sind Substrukturen i.d.R. ungenauer. Dies ist ein wesentlicher Grund, warum Substrukturen im Bereich von High-Speed-Crashlastfällen bislang wenig Anwendung finden. Um die große Komplexität im Crash erfassen zu können bedarf es detaillierter Fahrzeugmodelle. Eine Substruktur stellt hier stets ein Ersatzmodell da, welches mit weniger Informationen auskommen muss. Dabei muss man sich bewusst werden, dass sich die strukturellen

Veränderungen bei der Form- und Topologieoptimierung auf die gesamte Fahrzeugkarosserie auswirken – also auch auf die Bereiche, durch deren Reduktion die Substruktur abgeleitet wurde.

Betrachtet man jedoch die Verwendung von Substrukturen im Kontext der Form- und Topologieoptimierung einzelner Bauteile oder Baugruppen, so ist es zunächst ausreichend eine aussagekräftige und vergleichende Bewertung der optimierten Designvarianten zu erhalten. Es muss demnach auf Ebene der Substrukturen eine Tendenz bzgl. des anzustrebenden Optimums erkennbar sein. Ist also im Gesamtfahrzeugmodell Design A besser als Design B, so muss dies auch auf Ebene der Substrukturen gelten. Eine finale Absicherung erfolgt stets anhand des detaillierten Gesamtfahrzeugmodells.

Im Bereich der Finiten-Elemente ist das Component Modeling [Hallquist 2007] ein gängiges Mittel. Dabei wird die Substruktur über eine zu definierende Box aus dem FE-Modell herausgeschnitten. Die kinematischen Schnittgrößen (Verschiebungen und Rotationen) an den Schnittkanten folgen aus der Gesamtfahrzeugberechnung und können anschließend für weitere Untersuchungen auf die Substruktur aufgebracht werden. Bislang wird diese Methode überwiegend im Bereich von Low-speed-Crashlastfällen (z.B. Auslegung von Bumper-Systemen) oder zur Insassensimulation (z.B. Interaktion Dummy-Sitz-Airbag) genutzt. Der Grund liegt hierbei zum einen in der klar abzugrenzenden Substruktur. Es ergeben sich nur wenige Schnittkanten, die zudem noch klar definiert sind. Des Weiteren sind die Deformationen auf einen räumlich klar abgegrenzten Bereich beschränkt. Große strukturelle Veränderungen wie bei High-Speed-Crashlastfällen haben dagegen Auswirkungen auf einen deutlich größeren Bereich der Fahrzeugstruktur. Dabei stellt sich die Frage nach der räumlichen Abgrenzung der Substruktur. Hierzu muss das Gesamtfahrzeugmodell um gewisse Strukturkomponenten reduziert werden. Bislang kann dies nur durch manuelle Bearbeitung und vorhandenes Know-how der Berechnungsingenieure erfolgen. Gerade die manuelle Reduktion eines detaillierten FE-Modells kann u.U. sehr viel Zeit und Aufwand bedeuten. Durch die Reduktion von Strukturbauteilen ändern sich die Referenzbeziehungen in den Modellen z.B. durch fehlende PIDs bei den Kontaktdefinitionen. Dies muss entsprechend berücksichtigt und kontrolliert werden, um eine rechenfähige und aussagekräftige Substruktur zu erhalten.

Üblicherweise erfolgt die Definition der Substruktur anhand einer Box. Alle Strukturkomponenten innerhalb dieser Box definieren die Substruktur, Komponenten am Rand der Box werden geschnitten und Komponenten außerhalb der Box werden gelöscht. Dieses Vorgehen führt zu geraden Schnitten innerhalb von Bauteilen und ist mit relativ geringem Aufwand umzusetzen. In diesem Projektvorhaben wurde zusätzlich ein weiteres Vorgehen untersucht. Hierbei besteht die Substruktur aus überwiegend ganzen Komponenten, d.h. es wurden möglichst wenige Bauteile geschnitten, z.B. nur an Symmetrieachsen oder bei weit über die Substruktur ausragenden Bauteilen. Die kinematischen Randbedingungen werden hierbei nur an den Fügstellen und den geringfügigen Schnittkanten aufgebracht. Somit erfolgt die Kraftübertragung wie im Gesamtfahrzeugmodell an den dafür vorgesehenen Fügeverbindungen. Ein Austausch gesamter Komponenten wird zudem erleichtert. Bei der Box-Methode hingegen werden i.d.R. die kinematischen Randbedingungen auf alle Schnittkanten aufgebracht, also auch auf Bereiche, die sich innerhalb der Fahrzeugstruktur "frei" bewegen können. Es wird somit eine zusätzliche Restriktion aufgebracht. Das hier verwendete Vorgehen bedeutet zunächst einen erhöhten manuellen Aufwand, welcher jedoch durch eine genauere Abbildung der Kraftverläufe zu einem besseren Ergebnis führt. Des Weiteren stellt sich die Frage nach dem sinnvollen Umfang einer Substruktur. Ziel ist es möglichst viele Bauteile zu entfernen unter Beibehaltung einer aussagekräftigen Substruktur.

Hierzu wurden im Projekt Untersuchungen getätigt, welche im Nachfolgenden anhand eines Beispiels erläutert werden:

Als Ausgangsbasis dient das FE-Modell der Cabrio-Rohbaukarosserie von VW-Osnabrück. Hierbei wurden Teile von SFE in SFE CONCEPT aufgebaut, sodass sich ein kombiniertes LS-DYNA - SFE CONCEPT Modell ergibt (Abbildung II.1.1.6).

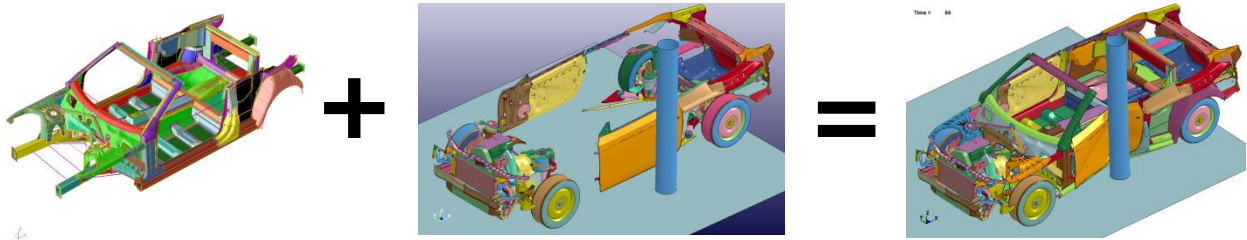


Abbildung II.1.1.6: SFE CONCEPT Modell (erzeugt simulationsfähiges FE-Modell) + externe Teile / Lastfall-Definition = LS-DYNA Crashberechnung

Zur Abgrenzung der Substrukturen wurden zwei wesentliche Kriterien herangezogen. So wurde aus den Ergebnissen der LS-DYNA Gesamtfahrzeugberechnung die Bauteile mit der größten internen Energie identifiziert (siehe Abbildung II.1.1.7 beispielhaft für den Lastfall IIHS Barriere Seite 50km/h).

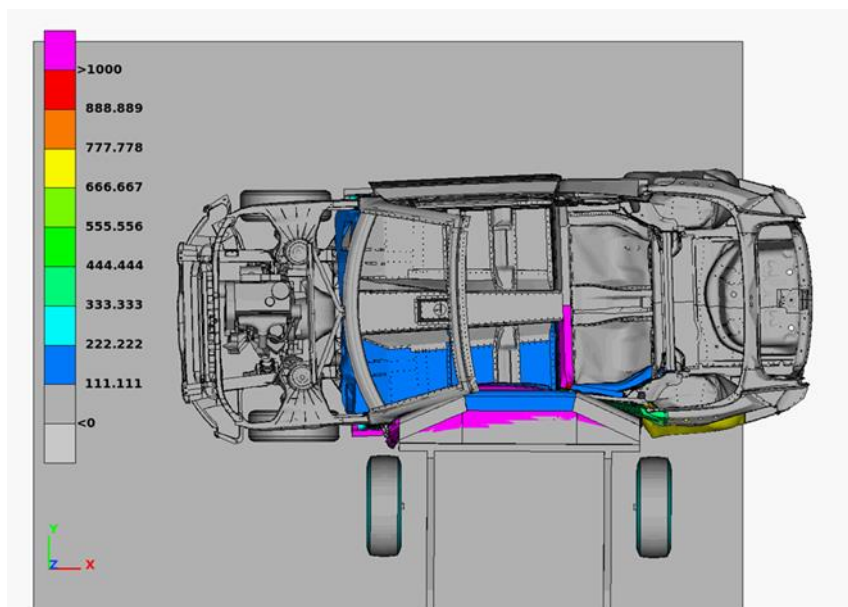


Abbildung II.1.1.7: Identifikation der Bauteile mit der größten Energieaufnahme (Lastfall IIHS Barriere 50km/h)

Des Weiteren wurden Knotenkontrollpunkte (Abbildung II.1.1.8) definiert, über welche sich die Relativbewegungen nachverfolgen lassen.

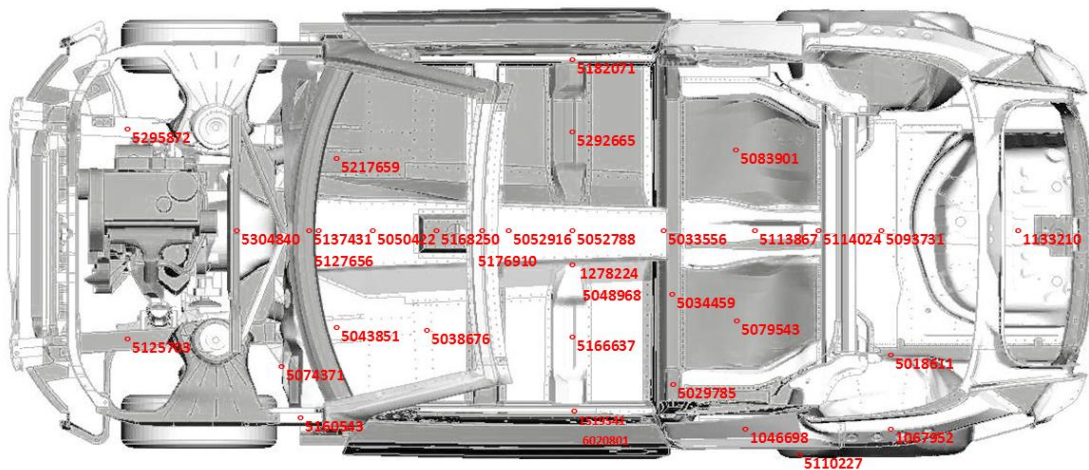


Abbildung II.1.1.8: Knotenkontrollpunkte zur Nachverfolgung der Relativbewegungen

Da zum Zeitpunkt der Untersuchungen die neuen Optimierungsmethoden noch nicht zur Verfügung standen, wurden neben dem Ausgangsquerschnitt (Referenz) für den Schweller fünf weitere Querschnitte (A-E) als mögliche Optimierungsergebnisse zum Vergleich herangezogen. Diese wurden über den Musterkatalog in SFE CONCEPT aufgebaut (Abbildung II.1.1.9), jedoch zunächst keiner Optimierung unterzogen.

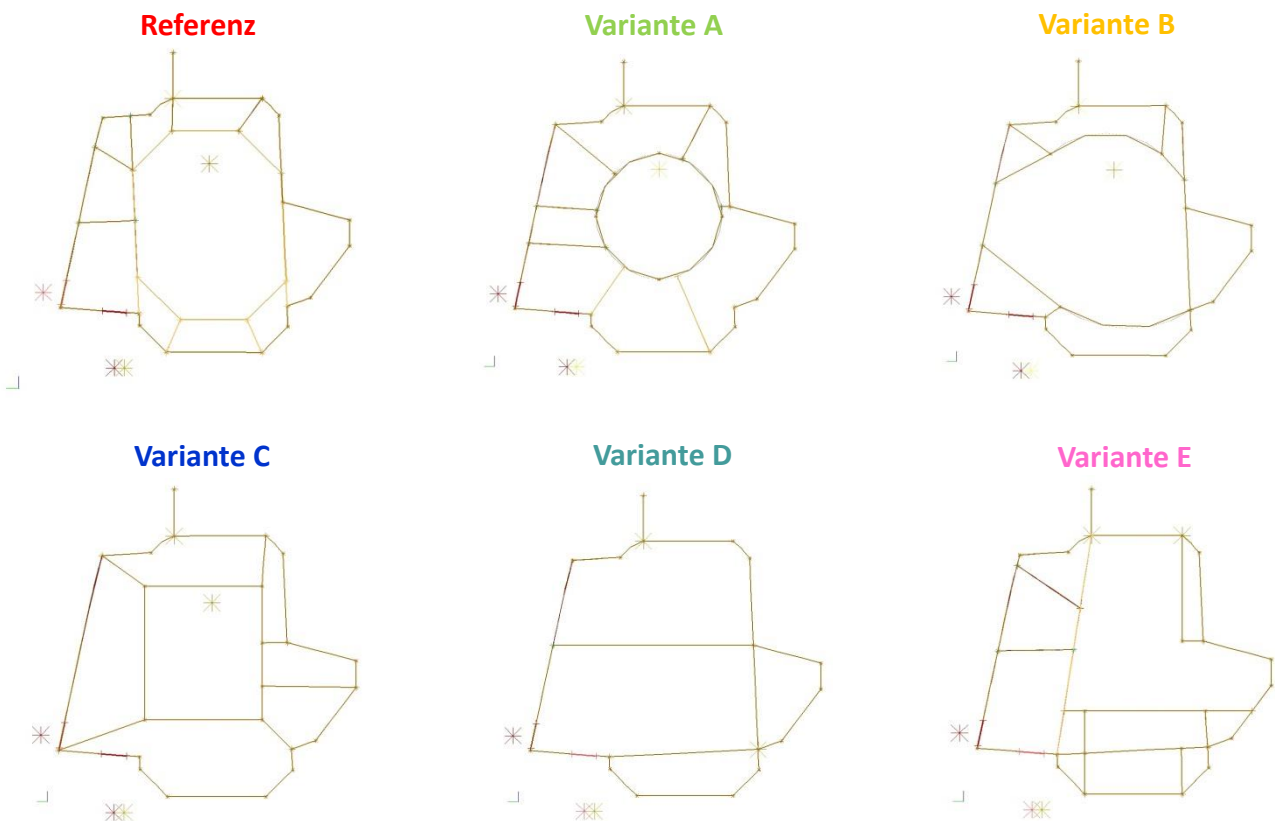
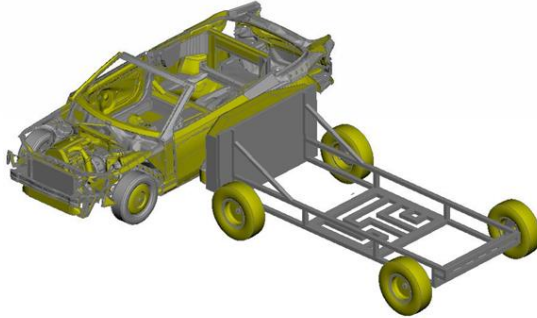


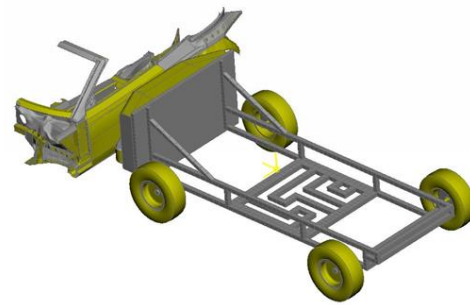
Abbildung II.1.1.9: Referenzquerschnitt und Vergleichsquerschnitte A-E für den Schweller

Gesamtfahrzeugmodell:



Schalenelemente: 579.222
 Volumenelemente: 5.787
 Berechnungszeit: 6h 57min
 [128 CPU CRAY HLRS]

Substruktur B1: 2406 Interface-Knoten



Schalenelemente: 171.844
 Volumenelemente: 2.041
 Berechnungszeit: 4h 5min
 [128 CPU CRAY HLRS]

Modellreduktion um ca. 70% - Rechenzeiterparnis: ca. 40%

Abbildung II.1.1.10: Vergleich Gesamtfahrzeugmodell und Substruktur

Abbildung II.1.1.10 zeigt den Vergleich zwischen dem Gesamtfahrzeugmodell und der abgeleiteten Substruktur. Die Substruktur umfasst im Wesentlichen die Strukturkomponenten zwischen dem vorderen und hinteren Radlauf sowie von der Fahrertüre bis zur Mitte des Tunnels. Hierbei ergibt sich durch eine Modellreduktion von ca. 70% in Bezug auf die Finiten-Elemente eine Rechenzeiterparnis von 40 %. Zu berücksichtigen ist, dass sich durch die strukturelle Abgrenzung der Substruktur auch die Zielgröße im Vergleich zum Gesamtfahrzeug ändern muss. Der B-Säulenabstand wie in Abbildung II.1.1.11 dargestellt kann für die Substruktur nicht verwendet werden.

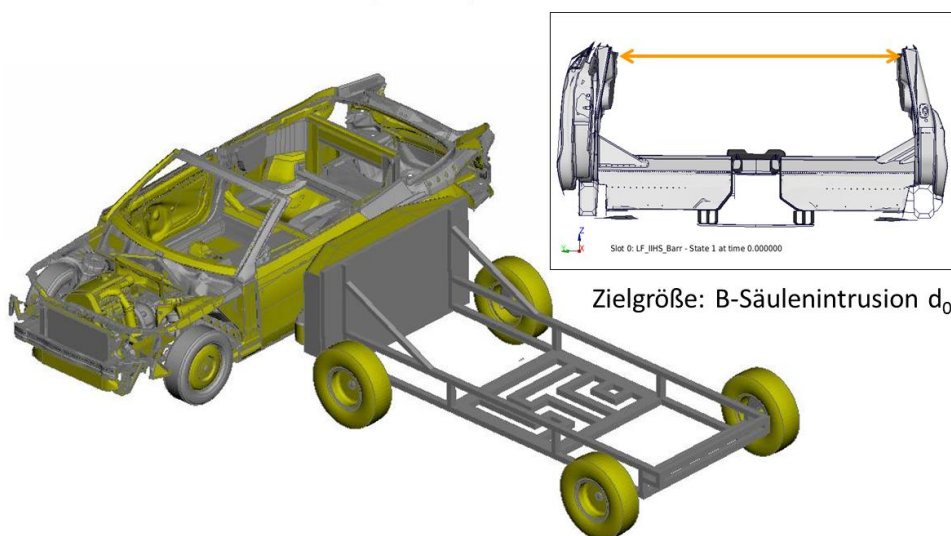


Abbildung II.1.1.11: Zielgröße B-Säulenabstand Gesamtfahrzeug IIHS Barriere Seite 50km/h

Anhand der zuvor definierten Kontrollpunkte konnte eine alternative Zielgröße definiert werden. Abbildung II.1.1.12 zeigt den Verschiebungsverlauf des Messpunktes P_0 in Tunnelmitte auf Höhe der B-Säule für die Gesamtfahrzeugberechnungen mit den sechs verschiedenen Querschnittsvarianten für den Schweller. Es ist zu erkennen, dass der Punkt P_0 für die sehr unterschiedlichen topologischen Varianten des Schwellerquerschnittes nahezu denselben Verschiebungsverlauf durchläuft. Somit wird die neue Zielgröße als Abstand der Türinnenkante bis zum Punkt P_0 definiert. Durch Sensitivitätsuntersuchungen am Gesamtfahrzeugmodell sowie den Substrukturen in Bezug auf die Zielgrößen wurde die Robustheit der Ergebnisse abgesichert. Ein vergleichbares Verhalten wurde auch für das Modell der Daimler AG identifiziert.

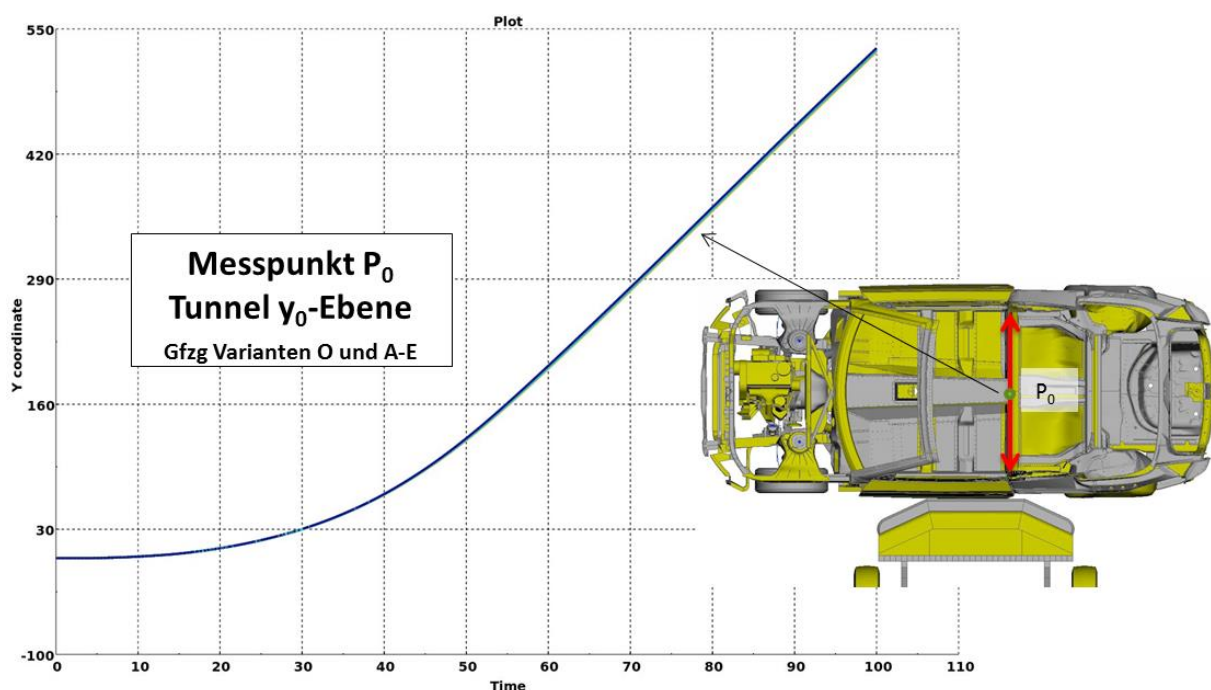


Abbildung II.1.1.12: Identifikation der neuen Zielgröße für die Substruktur

Nach Ableitung der Substruktur sowie der neuen Zielgröße, wurden die Interfaceknoten für die Übertragung der kinematischen Randbedingungen vom Gesamtfahrzeug auf die Substruktur definiert. Wie bereits zuvor beschrieben, wurde die Substruktur überwiegend Komponentenweise herausgeschnitten. Schnittkanten innerhalb von Komponenten ergeben sich insbesondere in Tunnelmitte. So setzen sich die Interface-Knoten aus zwei Klassen zusammen. Zum einen aus den Fügstellen und zum anderen aus den Schnittknoten der Komponenten (Abbildung II.1.1.13).

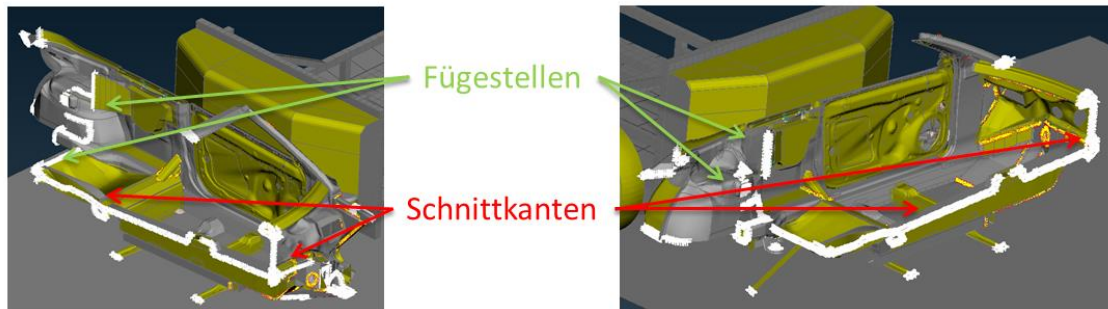


Abbildung II.1.1.13: Definition der Interface-Knoten an Fügestellen und Schnittkanten

Um die Güte der Substruktur in Hinblick auf die Verwendung innerhalb der Optimierungsprozedur zu überprüfen, wurden nach Definition der Interface-Knoten die kinematischen Randbedingungen für die Substruktur mit einer Gesamtfahrzeuggestaltung für den Referenzquerschnitt O ermittelt. Diese wurden anschließend auf die Substruktur aufgebracht, wobei der Schweller zusätzlich durch die Varianten A-E ausgetauscht wurde, unter der Annahme, dass es sich hierbei um weitere Optimierungsergebnisse handelt (Abbildung II.1.1.14). Untersuchungen haben gezeigt, dass unterschiedliche Anzahlen der Interface-Knoten, keine nennenswerte Auswirkung auf die Berechnungsdauer und die Größe der Interface-Datei haben.

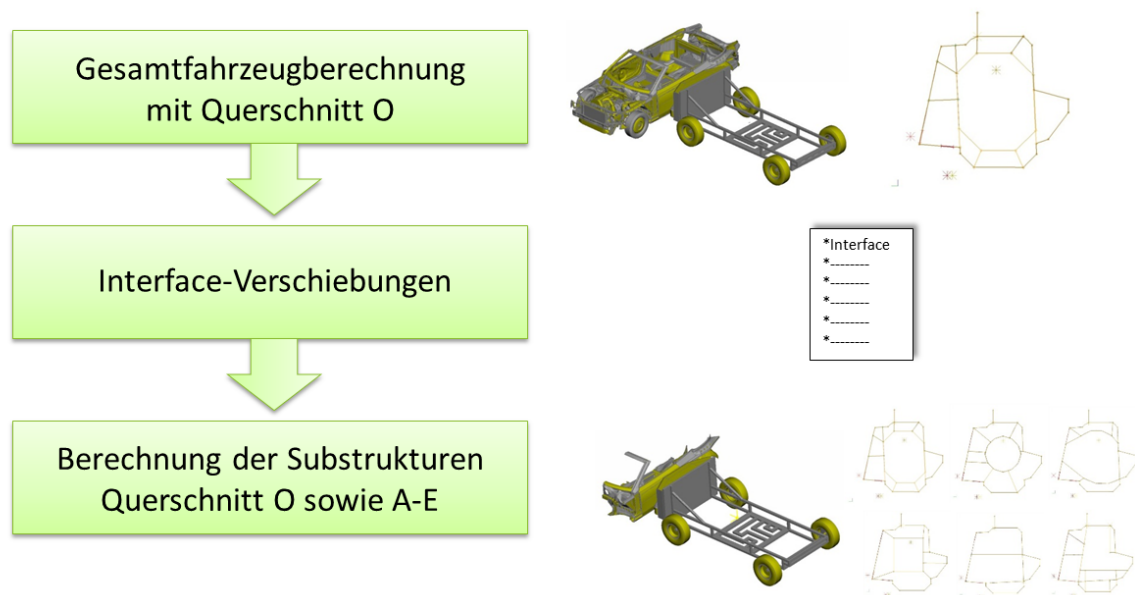


Abbildung II.1.1.14: Übertragung der Kinematischen Schnittgrößen auf die Substruktur

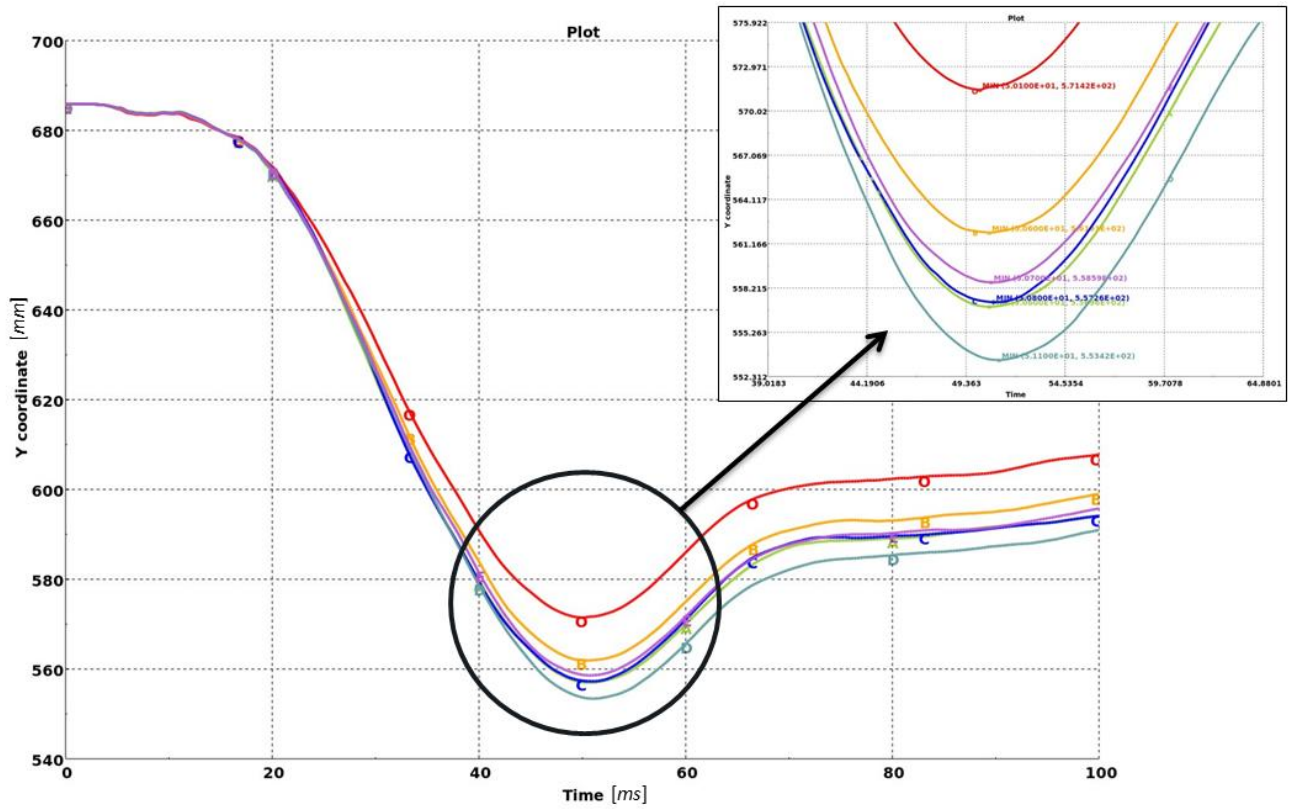


Abbildung II.1.1.15: Zielgrößenverlauf für die Gesamtfahrzeuggestaltung mit den Querschnitten O sowie A-E

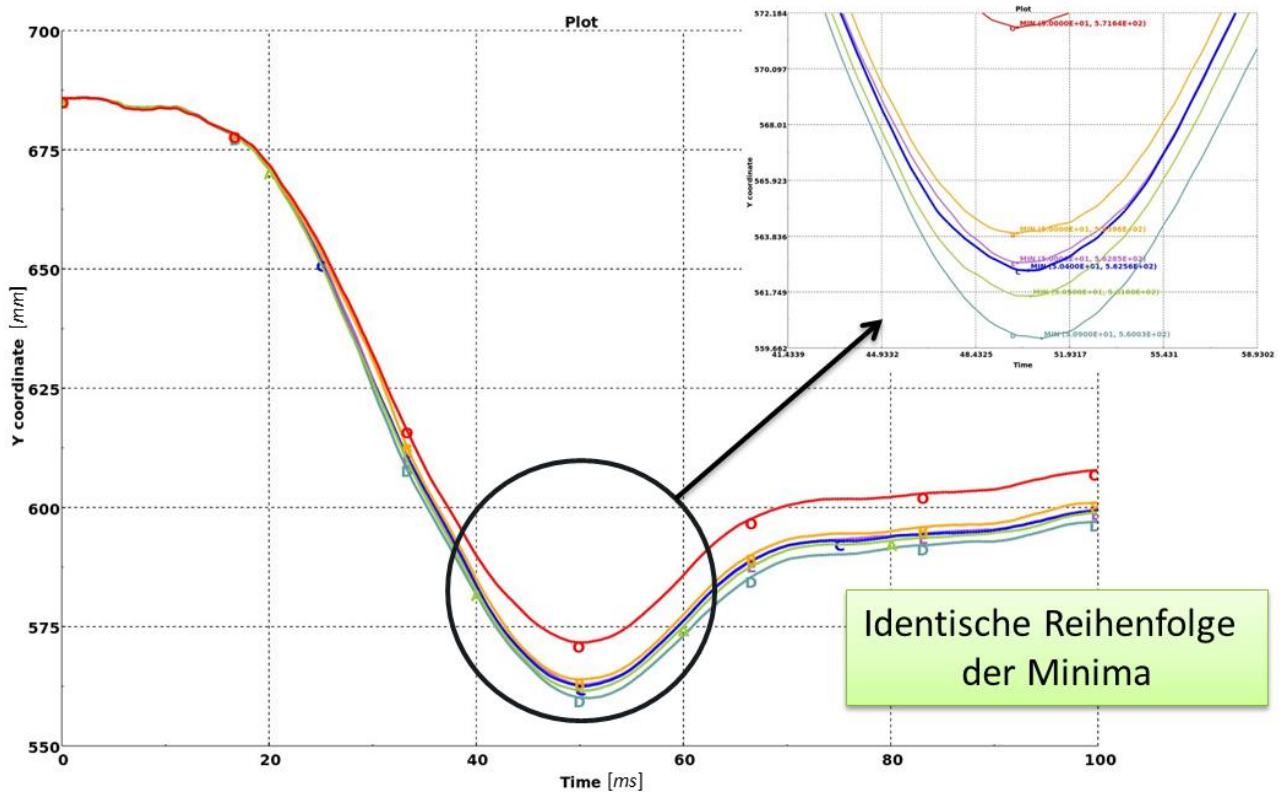


Abbildung II.1.1.16: Zielgrößenverlauf für die Substrukturberechnung mit den Querschnitten O sowie A-E

Die Abbildungen II.1.1.15 und II.1.1.16 lassen erkennen, dass die Zielgrößenverläufe für die Gesamtfahrzeugberechnungen und die Substrukturen sich zwar größtmäßig voneinander unterscheiden, die Reihenfolge der Minima jedoch dieselbe bleibt. Zudem zeigt Abbildung II.1.1.17, dass der Zielgrößenverlauf der Substruktur näher am Zielgrößenverlauf der Gesamtfahrzeugberechnung mit demselben Querschnitt liegt als im Vergleich zum Referenzquerschnitt, aus welchem die kinematischen Randbedingungen für die Substruktur abgeleitet wurden. Dies ist auch für die weiteren Querschnitte der Fall. Dies bedeutet, dass die Substruktur genügend Spielraum hat, um auf die topologischen Änderungen des Schwellerquerschnitts zu reagieren. Demzufolge würde man mit einer Optimierung auf Basis der Substruktur eine Verbesserung erreichen können, die sich auch bei der Verwendung des Gesamtfahrzeugmodells abzeichnen würde.

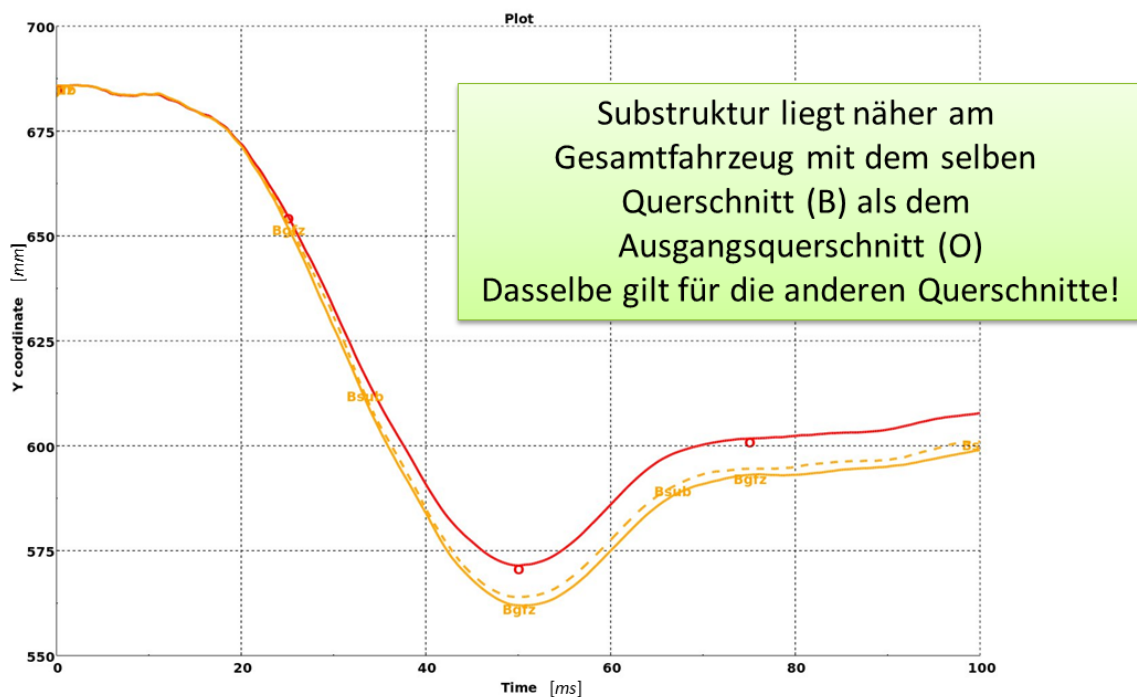


Abbildung II.1.1.17: Zielgrößenverlauf für den Schwellerquerschnitt O und B (Gesamtfahrzeug und Substruktur)

Fazit:

Die Substruktur-Methode kann auch für die Form- und Topologieoptimierung von High-Speed-Crashlastfällen sinnvoll eingesetzt werden. Hierzu sind folgende Punkte zu beachten:

- Sinnvolle Abgrenzung der Substruktur notwendig:
 - Identifikation der Komponenten mit größter Energieaufnahme.
 - Identifikation der Fahrzeugkinematik sowie der Relativbewegungen über Knotenkontrollpunkte und Vergleichsberechnungen. Es könnte z.B. zunächst eine sehr nachgiebige Struktur (leerer Schweller) mit einer sehr steifen Struktur (nahezu gefüllter Schweller) betrachtet werden.
 - Überwiegend komponentenweise Abgrenzung für realitätsnahe Kraftverläufe und vereinfachten Austausch von Komponenten.
 - Bereiche mit vielen Kontaktereignissen möglichst meiden.
- Stark abhängig vom Lastfall, jedoch vergleichbar für denselben Lastfall und verschiedene Fahrzeugklassen.
- Anpassung der Zielgröße u.U. notwendig.
- Modellreduktion sollte mind. 50% betragen um Antwortzeiten bedeutend zu verringern.

Weitere Untersuchungen sollen das hier beschriebene Vorgehen bestätigen, ausweiten und weiter verbessern. Dazu zählt u.a. die Reduzierung für den Aufwand bei der Substrukturableitung. Zudem sind Untersuchungen zum Update der kinematischen Randbedingungen mit Hilfe einer dazwischengeschalteten Gesamtfahrzeugberechnung geplant.

Anwendung der Methoden im Zusammenhang mit HPC-Clustern

Um die sehr rechenzeitintensiven Optimierungsmethoden validieren zu können, wurden über den Lenkungsausschuss des Höchstleistungsrechenzentrums Stuttgart – HLRS Rechenzeiten in Höhe von 2.000.000 Core-Stunden beantragt und ausgeschöpft. Für die Berechnungen standen sowohl das NEC Nehalem Cluster sowie die CRAY XE6 (113 664 Cores) zur Verfügung. Da es sich bei dem Projektvorhaben Crash-Topo um ein in Form und Umfang einzigartigen Optimierungsablauf am HLRS handelt, ergaben sich immer wieder neue Frage- und Problemstellungen. Diese wurden durch die gute Zusammenarbeit mit dem HLRS und dem asc(s) bzw. den Projektpartnern zielführend gelöst. So fanden regelmäßige Turnusgespräche zwischen dem HLRS und dem asc(s) statt. In der Regel sind Clustersysteme wie die CRAY XE6 für große Berechnungsjobs mit mehr als 1000 Cores ausgelegt. Im Projekt Crash-Topo ergaben sich jedoch sehr viele kleine Berechnungsjobs (128 CPUs). Hierbei stößt man schnell an Grenzen wie Beschränkungen bzgl. der Walltime (max. zulässige Laufzeit eines Jobs), max. Anzahl der parallelen Jobs oder Speicheranforderungen. Im Hinblick auf einen reibungslosen Betrieb der Cluster für alle Nutzer am HLRS wurden Lösungen erarbeitet und umgesetzt.



Abbildung II.1.1.18: CRAY XE6 am Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart - HLRS

II.1.2 Wissenschaftlich - technische Ergebnisse - DYNAmore

Der Tätigkeitsschwerpunkt von DYNAmore im Rahmen des Projekts galt der eingehenden Untersuchung und Beurteilung der nichtlinearen Topologieoptimierungsverfahren Hybrid Cellular Automata (HCA)-Methode und Equivalent Static Load (ESL)-Methode im Hinblick auf die Optimierung crashbeanspruchter Fahrzeugstrukturen. Die Ergebnisse der topologischen Optimierung geben eine erste Idee für eine optimale Struktur und dienen als Ausgangspunkt weiterer Optimierungsschritte in der mit den Projektpartnern entwickelten und realisierten Optimierungs-Prozesskette. Die Implementierungen der HCA- und ESL-Methode wurden entsprechend der im Laufe des Projekts gewonnenen Erfahrungen weiterentwickelt und zur Topologieoptimierung des Demonstrator-Modells, s.u., eingesetzt.

Eine kurze Einführung der beiden nichtlinearen Topologieoptimierungsmethoden wird im Folgenden gegeben.

Zur HCA-Methode:

Die Hybrid Cellular Automata- Methode (HCA) geht auf Ideen von von Neumann (Burks, 1970) zurück und wurde ursprünglich als heuristisches Verfahren zur Simulation von Populationen verwendet. Als Cellular Automata wird ein mit Gitterzellen diskretisiertes numerisches Modell bezeichnet. Die Gitterzellen können unterschiedliche Zustände einnehmen, die entsprechend vorgegebener Regeln aus den Zuständen der Gitterzelle und ihrer Nachbarschaft zum aktuellen Zeitpunkt und in vorangegangenen Zeitpunkten berechnet werden.

Patel (2007) übertrug die Idee der Cellular Automata auf die nichtlineare Topologieoptimierung crashbeanspruchter Fahrzeugstrukturen und entwickelte die im Folgenden beschriebene Methodik mit der Zielfunktion: Homogenisierung der inneren Energiedichte im Entwurfsraum. Die relative Dichte in den Finiten Elementen stellt hierbei den „Zustand der betrachteten Gitterzelle“ dar und der Zusammenhang zwischen der Feldgröße „innere Energiedichte“ und der relativen Dichte im Element stellt die heuristische Regel dar.

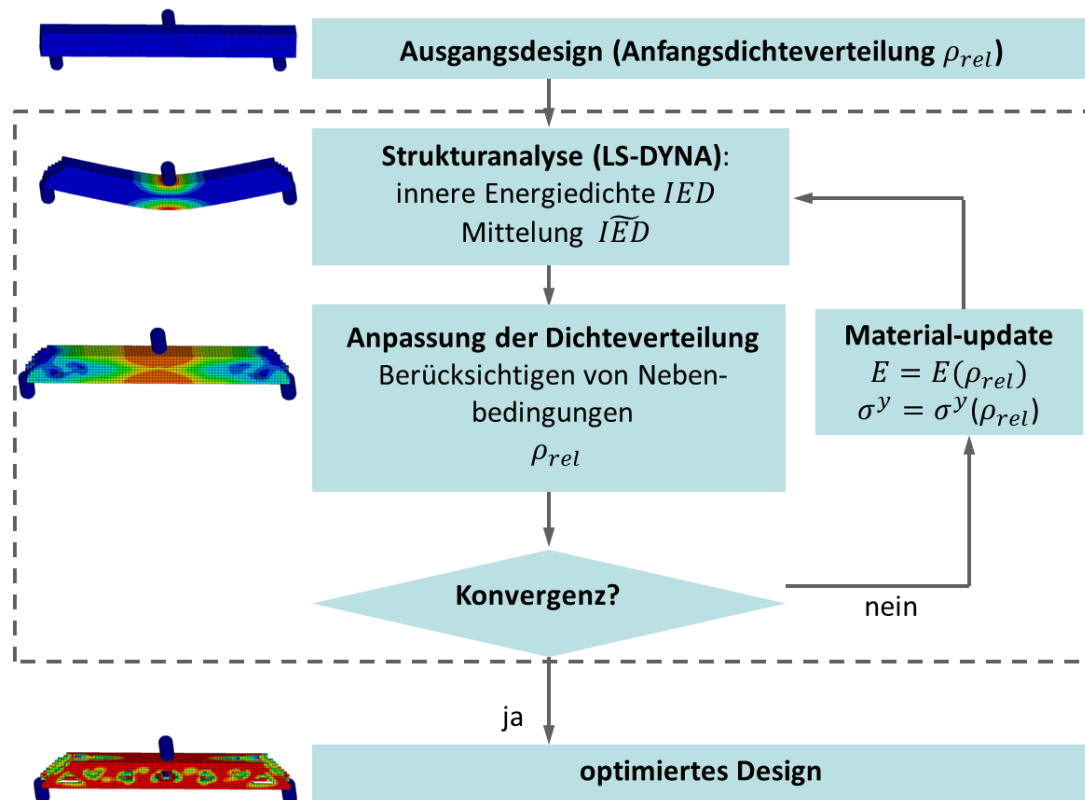


Abbildung II.1.2.1: HCA-Algorithmus

Ausgangspunkt einer HCA-Optimierung ist die Vorgabe der Struktur und des mit Volumenelementen diskretisierten Entwurfsraums unter den zugehörigen Lastfällen. Der iterative Optimierungsprozess startet mit der Strukturanalyse der jeweiligen Lastfälle mit der aktuellen Dichte- und zugehörigen Materialverteilung im Entwurfsraum, siehe Abbildung II.1.2.1. In der ersten Iteration ist die relative Dichte im Entwurfsraum konstant und erfüllt die Massen Nebenbedingung. Aus den bei der Strukturanalyse berechneten Spannungen σ und Dehnungen ε wird die innere Energiedichte $IED = \int \sigma d\varepsilon$ ermittelt und anschließend in einer vorgegebenen Elementnachbarschaft und über die vorangegangenen Iterationen gemittelt: \tilde{IED} . Um dem Ziel der gleichmäßigen Verteilung der inneren Energiedichte im Entwurfsraum

näher zu kommen, wird anschließend die Dichteverteilung ρ_{rel} angepasst. So wird in Bereichen hoher Beanspruchung - d.h. hoher innerer Energiedichte \widetilde{IED} - die Dichte vergrößert, in Bereichen geringer Beanspruchung wird die Dichte verringert. Bei der Berechnung der neuen Dichteverteilung werden auch die Nebenbedingungen berücksichtigt. Für die neue Dichteverteilung im Entwurfsraum wird die Verteilung der Materialeigenschaften im Entwurfsraum angepasst. Entsprechend des sogenannten SIMP-Ansatzes (Solid Isotropic Material with Penalisation of Intermediate Density, siehe Bendsoe, Sigmund (2003)) wird ein exponentieller Zusammenhang zwischen dem E-Modul und der relativen Dichte formuliert: $E := (\rho_{rel})^p E_0$, mit Exponent $p > 1,0$. Dieser bislang nur bei linearem Materialverhalten gängige Ansatz wird auch auf die nichtlinearen Materialparameter übertragen, beispielsweise auf die Fließspannung $\sigma^y := (\rho_{rel})^q \sigma_0^y$. Die exponentielle Abhängigkeit der Materialparameter von der Dichte bewirkt, dass sich im Laufe der Optimierungsiterationen - wie gewünscht - Null- oder Eins-Dichtezustände ausbilden können. Zwischendichtezustände z.B. $\rho_{rel} = 0,5$ sind unerwünscht, da sie keinem realen Material entsprechen. Die Optimierungsiterationen werden solange durchgeführt, bis die Massenumverteilung je Iteration einen Schwellwert unterschreitet.

Bei der HCA-Methode sind i.A. relativ viele Iterationen (i.A. ca. 30) bis zur Konvergenz notwendig, da es sich um ein heuristisches Optimierungsverfahren handelt, bei dem keine Gradienteninformation in den Optimierungsprozess einfließt.

Zur ESL-Methode:

Die Idee der Equivalent Static Load (ESL)-Methode geht auf Veröffentlichungen von Park (Park GJ 2011) zurück. Bei der ESL-Methode wird die eigentliche nichtlinear dynamische Optimierungsaufgabe in einen iterativen Prozess aus nichtlinear dynamischer Systemanalyse mit der aktuellen Dichteverteilung und anschließender linear statischer Multilastfalloptimierung für Ersatzlastzustände $F_t(\mathbf{x})$ aufgedröselt. Die Ersatzlasten werden jeweils aus den Verschiebungsfeldern $\mathbf{u}_t(\mathbf{x})$ zu ausgewählten Zeitpunkten t der nichtlinear dynamischen Systemanalyse abgeleitet, siehe Abbildung II.1.2.2. Sie werden unter der Annahme linearen Materialverhaltens und kleiner Deformationen unter Verwendung der linearen Steifigkeitsmatrix \mathbf{K}_{lin} berechnet: $\mathbf{F} = \mathbf{K}_{lin} \mathbf{u}$.

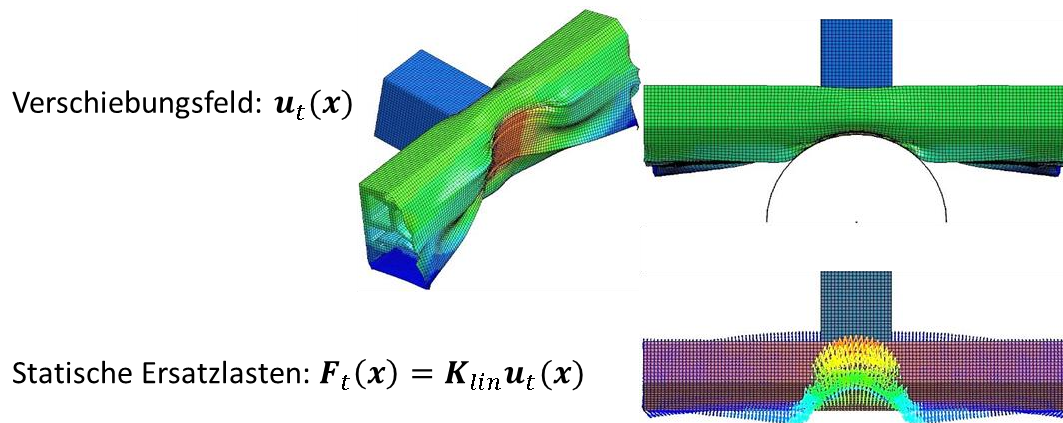


Abbildung II.1.2.2: ESL: Berechnung der Statischen Ersatzlasten

Die lineare Multilastfalloptimierung wird mit Genesis durchgeführt, einer etablierten gradientenbasierten Optimierungssoftware. Sie liefert eine für die statischen Ersatzlastzustände optimale Dichteverteilung. Für die neue Dichteverteilung werden die zugehörigen Materialparameter für die darauf folgende nichtlinear dynamische Analyse berechnet. Dabei sind die Materialparameter als exponentielle Funktion der relativen Dichte parametrisiert, entsprechend des SIMP-Ansatzes, s.o.. Die nächste ESL-Iteration startet mit der nichtlinear dynamischen Analyse (mit LS-DYNA) für die neue Dichte- und Materialverteilung im Entwurfsraum. Die algorithmische Umsetzung der ESL-Methode ist in Abbildung II.1.2.3 dargestellt.

Ein wichtiger Aspekt der ESL-Methode ist das automatisierte Generieren eines linear statischen Genesis-Eingabefiles im Nastran-Format aus dem vorhandenen nichtlinear dynamischen Eingabefile für die Systemanalyse im LS-DYNA-Format.

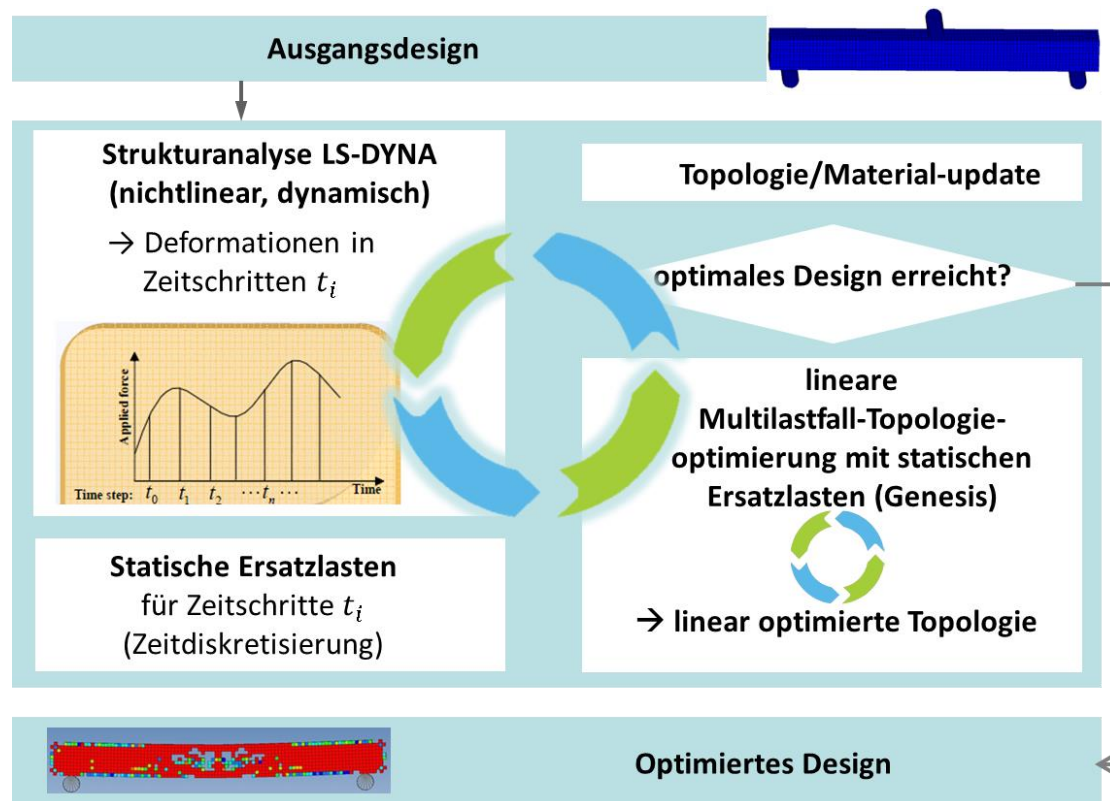


Abbildung II.1.2.3: ESL-Algorithmus

Ein wichtiger Teil unserer Projektarbeit war die Weiterentwicklung der Implementierungen der HCA- und ESL-Methode im Hinblick auf die Durchführbarkeit der geplanten Optimierungen. Die wichtigsten Softwareverbesserungen sind nachfolgend aufgeführt.

Implementierung HCA – Weiterentwicklung der Software :

Folgende Erweiterungen bzw. Verbesserungen der von LSTC bestehenden Implementierung der HCA-Methode (LS-TaSC) haben sich als notwendig erwiesen und wurden realisiert:

- Den Anforderungen des Projekts entsprechend wurde die HCA-Methode auf die Optimierung für gleichzeitig dynamische explizite Lastfälle (hier crash-Beanspruchungen) und linear statisch implizite Lastfälle (Festigkeitsanforderungen unter Biegung und Torsion) erweitert. Dazu gehört auch das automatisierte dynamische Wichten der Lastfälle.
- Um das Vernetzen des Entwurfsraums bei komplexen geometrischen Formen zu erleichtern, wurden Pentader-Elemente implementiert. Zuvor konnten lediglich Hexaeder-Elemente verwendet werden. Auch die Fertigungsrestriktion „Extrusion“ kann nun bei Vernetzung des Entwurfsraums mit Pentaeder-Elementen realisiert werden.

- An dem Fahrzeugmodell, das Daimler den Projektpartnern zur Verfügung gestellt hat, wurde die Notwendigkeit offensichtlich, die Implementierung der Extrusionsrestriktion für beliebig komplexe Aussparungen mit Hinterschneidungen, Löchern und bei schrägem Anschnitt zu erweitern, siehe Abbildung II.1.2.4.

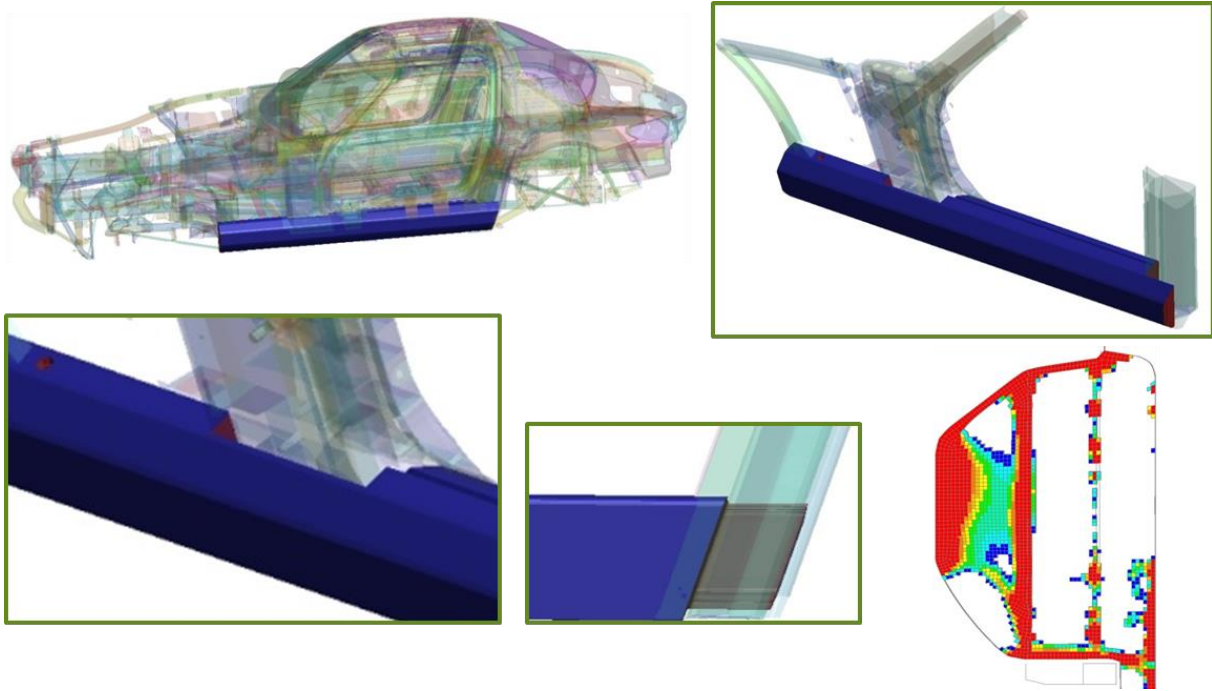


Abbildung II.1.2.4: Schweller des von Daimler zur Verfügung gestellten Fahrzeugmodells

- Für die Durchführung der HCA-Optimierung des Prozesskettenmodells sowie der Industriemodelle bei Vernetzungen mit 1-2mm Elementkantenlänge (das entspricht für das Prozesskettenmodell 9 Millionen bzw. 1 Million Volumenelementen im Entwurfsraum) waren performance-Verbesserungen der Implementierungen notwendig. Die massiv parallele Gebietszerlegung wurde verbessert, was deutliche Einsparungen bezüglich Arbeitsspeicher und Analysezeiten bewirkte.

Implementierung ESL - Weiterentwicklung der Software:

Folgende Erweiterungen bzw. Verbesserungen der bestehenden Implementierung der ESL-Methode (Genesis/ESL) haben sich als notwendig erwiesen und wurden realisiert:

- Zur Berechnung der statischen Ersatzlasten konnte zunächst nur auf Dateien im ASCII-Format zugegriffen werden. Zur Handhabung größerer Datenmengen ist hierfür nun auch der Zugriff auf die Verschiebungen $\mathbf{u}_t(\mathbf{x})$ im binären Datenformat möglich.
- Beim der Durchführung von ESL-Optimierungen crashbeanspruchter Fahrzeugstrukturen wurden Fehler bei der Übertragung von Kontaktdaten festgestellt und behoben.
- Ebenso wurde ein Fehler bei der Materialparametrisierung behoben.
- Bei der ESL-Methode empfiehlt es sich, die impliziten linearen Multilastfall-Optimierungen auf einem arbeitsspeicherstarken Rechner durchzuführen, die explizit dynamischen DYNA-Analysen dagegen parallelisiert auf einem Cluster (viele CPUs) durchzuführen. Sowohl für die DYNAmore eigene Rechnerumgebung als auch für das HLRS wurden Skripte erstellt, um den Prozessablauf zwischen linearer Optimierung mit Genesis, Erstellung neuer DYNA-Inputfiles mit aktuellen Dichte- und Materialdaten, Durchführung der dynamisch expliziten DYNA-Analysen und anschließender Berechnung der statischen Ersatzlasten auf unterschiedlichen Rechnern zu steuern.
- Bei der Optimierung des Prozesskettenmodells und der Industriemodelle wurde offensichtlich, dass nach der Erstellung der aktuellen Dichteverteilung mit Genesis ein Zusammenfassen von Bereichen ähnlicher Dichte in diskreten Dichteabstufungen notwendig ist, siehe Abbildung II.1.2.5. Nur so kann die Anzahl der Part- und Materialkarten bei der Erstellung des DYNA-Inputs auf ein sinnvolles Maß reduziert werden. Ansonsten übersteigt der notwendige Arbeitsspeicher zur Durchführung der DYNA-Analysen die am HLRS vorhandenen Ressourcen.

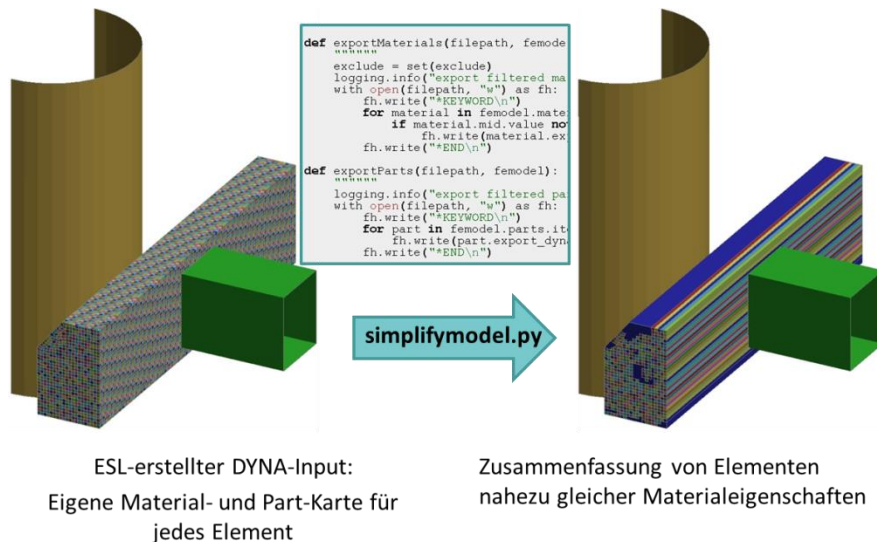


Abbildung II.1.2.5: Zusammenfassung von Elementen ähnlicher Dichte zu Parts

- Ein zentraler Punkt der ESL-Methode ist die Überführung des nichtlinear dynamisch expliziten DYNA-Modells (Eingabefiles) in ein lineares Eingabefile im Nastranformat für den linearen Optimierer Genesis. Die Implementierung der ESL-Methode zu Projektbeginn umfasste die Übersetzung vieler Standardkeywords. Jedoch insbesondere für den Transfer von Verbindungselementen, sowie vieler Materialien, Elementtypen und Kontakte vom DYNA-Input zum Genesis/Nastran-Input wurde das Schnittstelleninterface „dyna2nastran“ programmiert.

Infrastruktur am HLRS für HCA- und ESL-Optimierungen

Während des Projekts wurde am HLRS die notwendige Infrastruktur für die Durchführung von ESL- und HCA-Optimierungen geschaffen. Derartige lang laufende Prozesse bei gleichzeitig hohem Arbeitsspeicher und CPU-Bedarf gehören nicht zu den Standardprozessen am HLRS. Neben dem Erstellen von Skripten und Testläufen war viel Kooperationsarbeit mit dem HLRS notwendig, da auch Standardbeschränkungen wie beispielsweise 24h-Limits auf Rechenknoten und 2CPUh-Limits auf sogenannten Frontendknoten nicht mit den Optimierungsaufgaben vereinbar waren. Der Aufwand, die Optimierungsprozesse am HLRS zu realisieren, war deutlich höher als vorab angenommen wurde.

Gegenüberstellung mit Zielen:

Sowohl die Implementierung der HCA-Methode als auch der ESL-Methode sind auf einem Stand, mit dem die beabsichtigten Optimierungen sowohl für das Prozesskettenmodell als auch für die Industriemodelle durchgeführt werden können. Die Ziele dieses Arbeitspakets konnten daher vollständig erfüllt werden. Das Schnittstelleninterface wird in Zukunft bei Anwendung der ESL-Methode auf weitere Industriemodelle stetig weiterentwickelt werden.

Voroptimierungen mit der HCA-Methode:

Für ein vertieftes Verständnis und zur Beurteilung der Methoden sowie zu Testzwecken der Implementierungen wurden verschiedene Modellbeispiele aufgesetzt. Nachfolgend werden einige dieser Ergebnisse gezeigt.

Testbeispiel 1:

Ein Impaktor trifft mit 36 km/h auf einen beidseitig über Kontakt gelagerten Träger aus Aluminium auf, siehe Abbildung II.1.2.6. Gesucht ist eine optimale Topologie für die Zielfunktion: Homogenisierung der IED. Als Nebenbedingungen wird eine relative Masse von 25% gefordert und die maximale Durchbiegung unter dem Impaktor soll <70mm sein. Dieses Beispiel soll die HCA-Methode unter dynamischer Beanspruchung, ähnlich einem Crashlastfall, bei Kontakt und nichtlinearem Materialverhalten überprüfen.

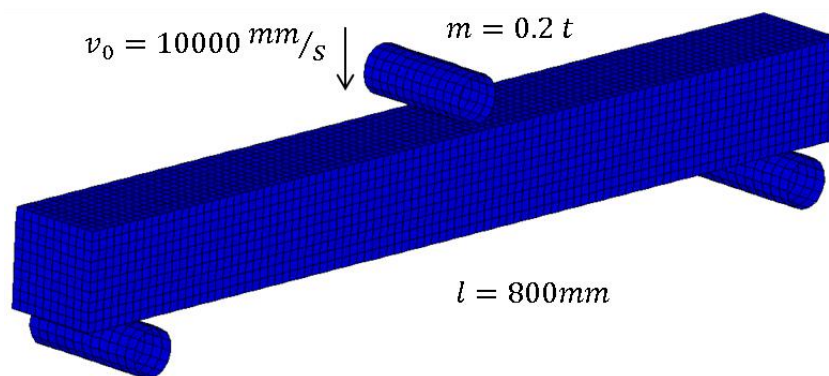


Abbildung II.1.2.6: Modell Testbeispiel 1

In Abbildung II.1.2.7 ist das Ergebnis der HCA-Optimierung dargestellt: Die relative Dichteverteilung, sowie das Konvergenzverhalten der Optimierung und das Einhalten der Verschiebungsnebenbedingung. Rot sind hierbei Bereiche mit einer relativen Dichte von 1.0 –

das bedeutet volles Material, blau bzw. gelöscht sind die Elemente mit einer relativen Dichte von 0.0.

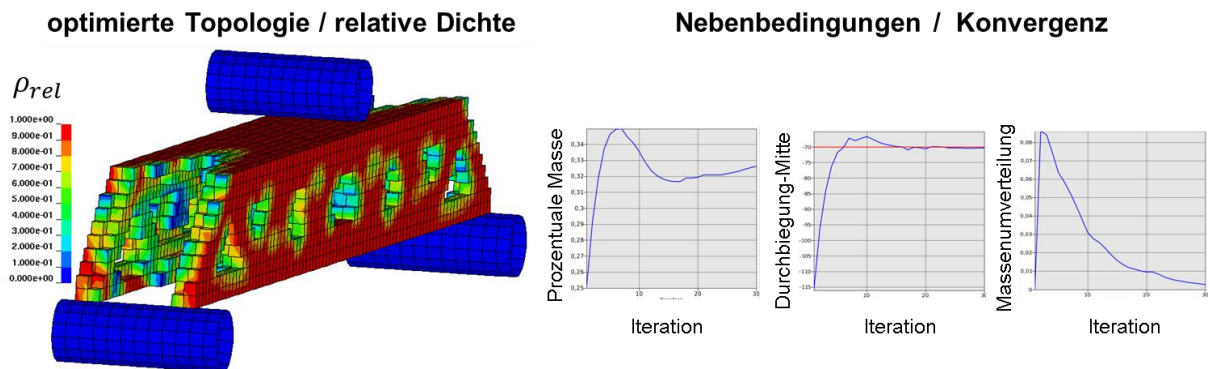


Abbildung II.1.2.7: Testbeispiel 1 – Optimierte Topologie, Konvergenzverhalten, Einhaltung der Nebenbedingungen

→ Als optimale Topologie bildet sich ein Fachwerkträger heraus, eine sinnvolle Struktur zur Abtragung der Impaktlast zu den Lagerungen. Am Konvergenzdiagramm ist zu erkennen, dass 30 Iterationen zur Konvergenz notwendig sind – das entspricht 30 Systemanalysen. Diese Größenordnung ist typisch für HCA-Optimierungen, da es sich um eine heuristische Methode handelt. Konvergenzkriterium ist die relative Massenumverteilung je Iteration. Die Verschiebungsnebenbedingung (Durchbiegung < 70mm) wird exakt eingehalten, die Massen Nebenbedingung wird angepasst, bis die Verschiebungsnebenbedingung eingehalten werden kann.

Testbeispiel 2:

Dieselbe Struktur wie im Testbeispiel 1 soll nun bei gleicher Zielfunktion und Nebenbedingungen unter dem Herstellungszwang Extrusion mit der HCA-Methode optimiert werden. Die Ergebnisse dieser Optimierung sind in Abbildung II.1.2.8 zu sehen.

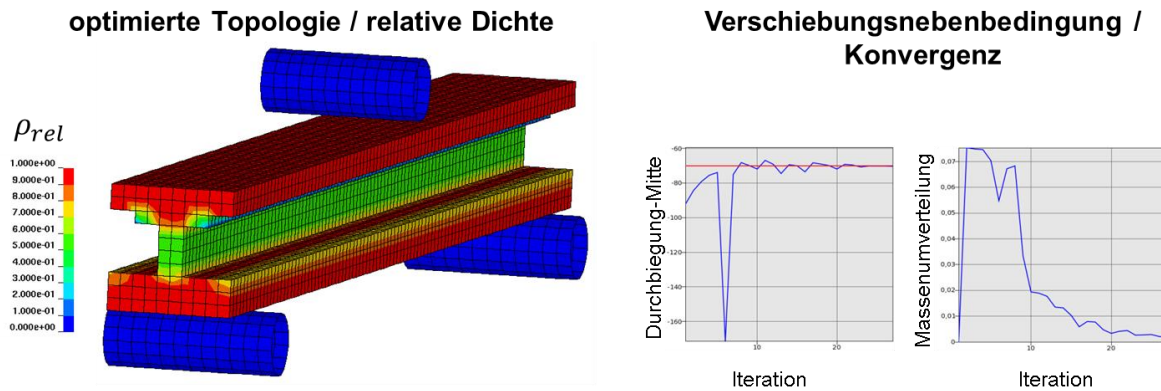


Abbildung II.1.2.8: Testbeispiel 2 - Optimierte Topologie, Konvergenzverhalten, Einhaltung der Nebenbedingungen

➔ Als optimierte Topologie bildet sich ein Doppel-T-Träger, eine sinnvolle Struktur für biegebeanspruchte Träger. Die Biegung kann als Druckspannungen im oberen Flansch und Zugspannung im unteren Flansch abgetragen werden. Im mittleren Balkenquerschnittsbereich sind die Dehnungen und Spannungen gering (Nullfaser in Balkenmitte). Daher ist die innere Energiedichte dort geringer. Es bildet sich hier ein Steg mit relativer Dichte=0,5. Bei Verfeinerung der Vernetzung im Entwurfsraum ist zu erwarten, dass sich ein dünnerer Steg mit relativer Dichte=1,0 bilden kann. Das Verbleiben der optimierten Dichteverteilung bei Zwischendichtezuständen ist i.A. ein Zeichen dafür, dass die gewählte Elementkantenlänge zu groß ist.

Für HCA-Optimierungen von biegebeanspruchten Trägern unter Extrusionsnebenbedingungen, wie beispielsweise die Optimierung eines Schwellers unter Pfahlaufprall, hat sich herausgestellt, dass in der optimalen Dichteverteilung die Ausbildung von Stegen problematisch sein kann. Zum einen weil dies die Bereiche um die neutrale Faser sind. Zum anderen findet entsprechend der Zielfunktion: „Homogenisierung der IED“ auch in Extrusionsrichtung eine Mittelung statt und der lokal hohen Beanspruchung wird unter Umständen nicht genug Rechnung getragen. Dies kann zu zerrissenen Topologien führen, s.u..

Testbeispiel 3:

Eine HCA-Optimierung des folgenden Modells wurde von Patel (2007) veröffentlicht und dient hier als Benchmark. Ein Kniemodell impaktiert eine starre Lastverteilungsplatte, die über dem Entwurfsraum angeordnet ist. Das Material im Entwurfsraum ist Aluminium. Zielfunktion ist die Homogenisierung der inneren Energiedichte, als Nebenbedingung wird eine relative Masse von 15% Masse gefordert. In Abbildung II.1.2.9 ist links das Modell mit dem Entwurfsraum für den Kniefänger und rechts die optimierte Verteilung der relativen Dichte dargestellt.

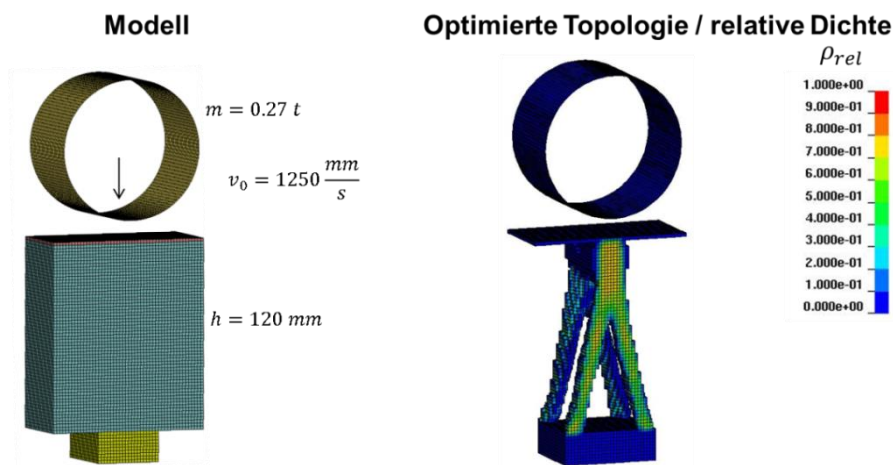


Abbildung II.1.2.9: Kniefänger (Entwurfsraum links und optimierte Topologie rechts)

Die von Patel (2007) optimierte Topologie ist in Abbildung II.1.2.10 dargestellt. Das Ergebnis in Abbildung II.1.2.9 stimmt sehr gut mit dem Benchmark Ergebnis (Abbildung II.1.2.10) überein. Es bildet sich jeweils eine auf vier Stützen gelagerte Struktur. Geringe Unterschiede ergeben sich aus der Wahl des Nachbarschaftsradius, der Mittelung der inneren Energiedichte über vorangegangene Iterationsschritte sowie der Untergrenze der relativen Dichte, die zum Löschen der Elemente gewählt wird.

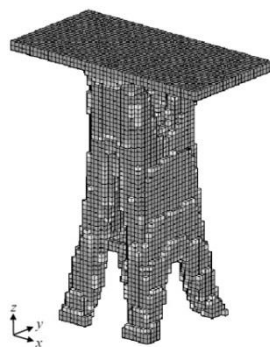


Abbildung II.1.2.10: Benchmark Ergebnis Kniefänger Patel (2007)

Voroptimierungen mit der ESL-Methode

Testbeispiel 1:

Das Testbeispiel 1 zur HCA Methode (siehe Abbildung II.1.2.6.) wird mit der ESL-Methode für die Zielfunktion „Minimierung der Masse“ unter der Nebenbedingung: Maximale Durchbiegung <70mm optimiert. Es stellt sich die in Abbildung II.1.2.11 dargestellte Topologie ein, ein unterspannter Bogen. Zur Einhaltung der Verschiebungsnebenbedingung wird hier eine relative Masse von ca. 45% benötigt.

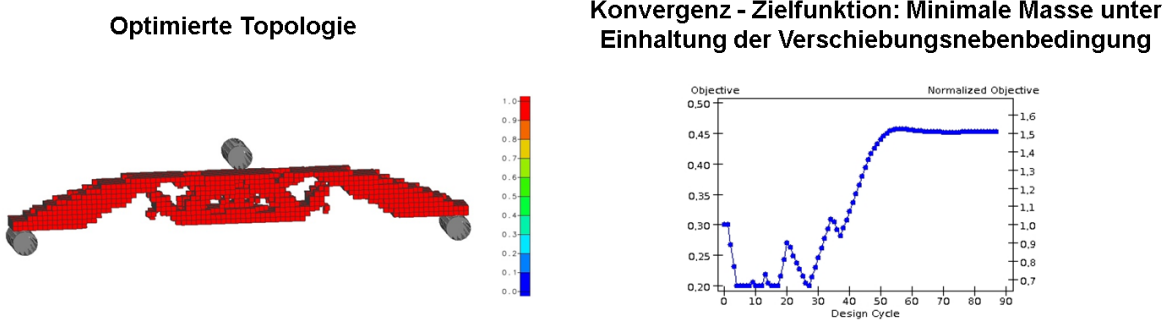


Abbildung II.1.2.11: Testbeispiel 1 ESLM

Testbeispiel 2:

Das Benchmark Beispiel des Kniefängers, s.o., wird mit der ESL-Methode optimiert, siehe Abbildung II.1.2.12. Zielfunktion ist die Minimierung der inneren Energie, als Nebenbedingung sind 15 % Masse vorgegeben.

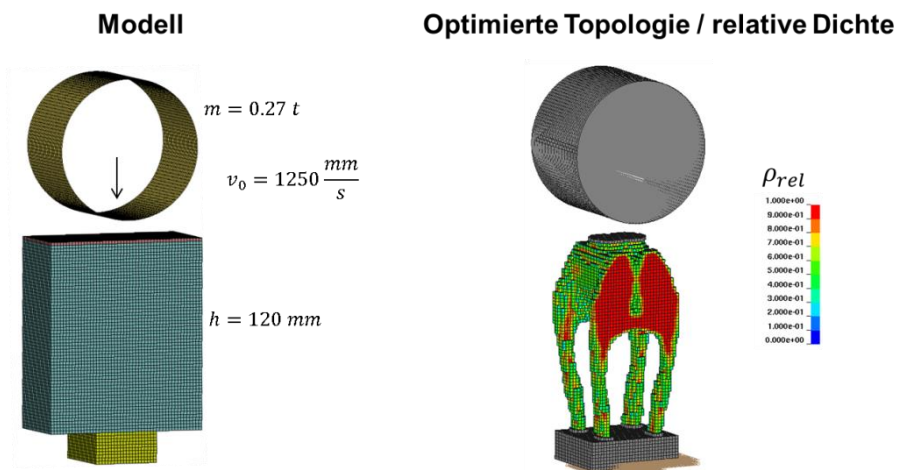


Abbildung II.1.2.12: Kniefänger mit ESL-Methode optimiert

Die entstehende Topologie hat gewisse Parallelitäten zum Ergebnis der HCA-Methode: Es lagert sich Material im Bereich der maximalen Beanspruchung unter dem Impaktor an, gelagert auf vier Stützen. Da bei der HCA-Methode die Zielfunktion vorgegeben ist: Homogenisierung der inneren Energiedichte, das entspricht einer maximalen Materialausnutzung, und dies keine der möglichen Zielfunktionen von Genesis/ESL ist, kann keine direkte Übereinstimmung der optimalen Topologie erwartet werden. Die hier gewählte Zielfunktion „minimal innere Energie“ erzeugt eine möglichst steife Topologie.

Beurteilung der Eignung der Methoden und Vergleich HCA und ESL

Beurteilung der HCA-Methode:

Die HCA-Methode eignet sich zur Topologieoptimierung dynamischer, nichtlinearer Prozesse. Als heuristische Methode ist die HCA-Methode sehr robust. Die Handhabung zur Eingabe des Optimierungsproblems und zur Ergebnisauswertung ist anwenderfreundlich gestaltet und ermöglicht auch Anwendern aus dem Analysebereich ohne große Vorkenntnisse im Bereich Optimierung eine sinnvolle Nutzung. Die Methode ist jedoch ausschließlich auf das Ziel „Homogenisierung der inneren Energiedichte“ (gleichmäßige Materialausnutzung) ausgerichtet. Falls eine Optimierung jedoch zur Energieabsorption im Crash-Lastfall eine Topologie entwickeln soll, die unter der Crash-Beanspruchung faltet und beult, d.h. falls lokale hohe Beanspruchungen erwünscht sind, widerspricht das dem Ziel der HCA-Methode einer möglichst gleichmäßigen Verteilung der inneren Energiedichte. Für diesen Fall empfehlen wir die ESL-Methode.

Mit der HCA-Methode können Nebenbedingungen nur indirekt über ein entsprechendes Anpassen der Massennebenbedingung realisiert werden und falls mehrere Nebenbedingungen gefordert werden, können diese nur qualitativ, nicht jedoch quantitativ erfüllt werden. Da die Topologieoptimierung im Allgemeinen nur eine erste Idee einer möglichen Struktur geben soll, und eine eigentliche Formoptimierung noch folgt, ist dieses Manko von untergeordneter Bedeutung.

Für den Herstellungszwang Extrusion wird die innere Energiedichte in Extrusionsrichtung gemittelt. Das kann dazu führen, dass lokale hohe Spannungen bzw. Dehnungen nicht ausreichend erfasst werden. Es kann dadurch unter Umständen zu zerrissenen Topologien

kommen. So führte beispielsweise die HCA-Optimierung des Prozesskettenmodells (s.u.) für die Lastfälle Crash, Biegung und Torsion zu folgender Topologie (Querschnitt des Extrusionsträgers):

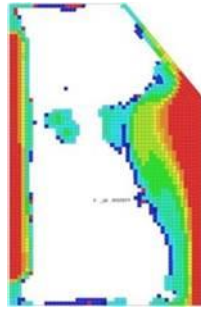


Abbildung II.1.2.13 HCA-Optimierung des Prozesskettenmodells

Ein Steg wurde hier nicht vollständig ausgebildet, da für den Crash-Lastfall die an der Impaktstelle vorhandene hohe Beanspruchung über die Extrusionslänge gemittelt wurde und zusätzlich für die Lastfälle Biegung und Torsion in der Mitte des Hohlkastenträgers die unbeanspruchte „neutrale Faser“ liegt.

Beurteilung der ESL-Methode:

Die ESL-Methode ist sehr gut zur Topologieoptimierung bei nichtlinear dynamischen Beanspruchungen geeignet. Die der Methode zugrunde liegende Linearisierung des Deformationsprozesses schränkt den sinnvollen Anwendungsbereich jedoch auf Beanspruchungen mit mäßigen Deformationen ein. So eignet sich die Methode hervorragend für Optimierungen bei großflächigem Beulverhalten, wie beispielsweise den betrachteten Pfahlaufprall auf einen Schweller, oder auch für Optimierungen im Bereich Fußgängerschutz (Kopfimpakt auf Motorhaube) oder auch bei komplexen Kontaktsituationen, beispielsweise bei der Optimierung eines Zahnrades, siehe Abbildung II.1.2.14.

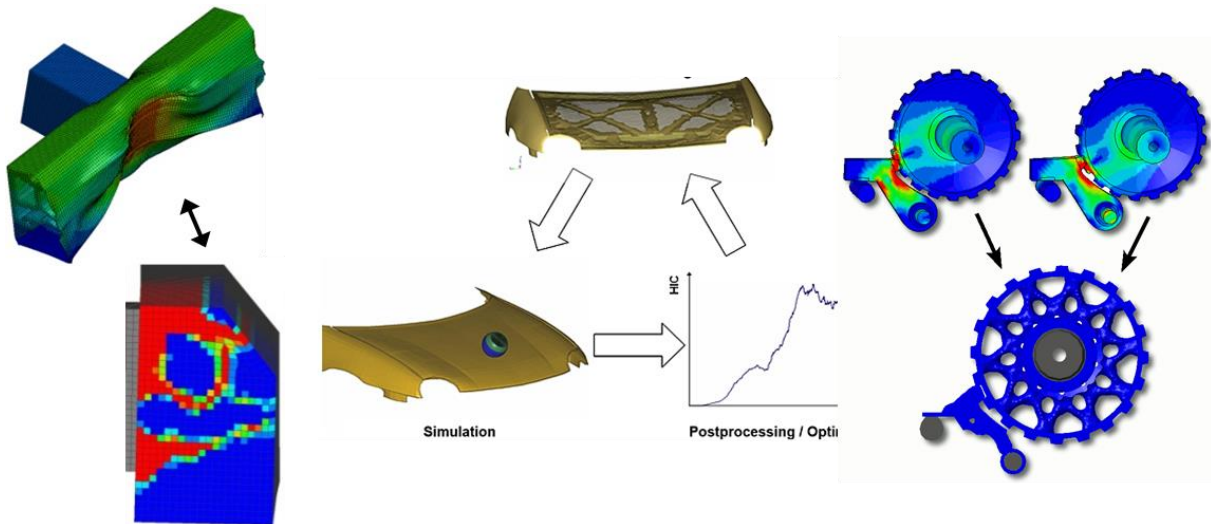


Abbildung II.1.2.14 geeignete Anwendungsbeispiele für die ESL-Methode

Die Grenze der Anwendbarkeit der Methode ist sehr lokales Falten und Beulen, wie in Abbildung II.1.2.15 dargestellt.

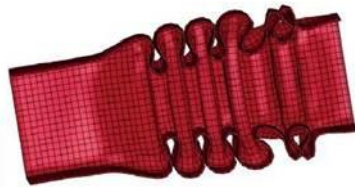


Abbildung II.1.2.15 sehr lokales Falten bei der ESL-methode

Hier bilden sich lokal bei Erreichen der Fließspannung sogenannte Fließgelenke aus. Die dann notwendige Kraft, bzw. das dann notwendige Moment, um nach Ausbildung eines Fließgelenkes eine sehr große Beulverformung zu verursachen, ist sehr klein, siehe Abbildung II.1.2.16. Für die Berechnung der linearen Ersatzlasten für die Durchführung der Optimierung mit Genesis wird die lineare Steifigkeit verwendet: $F_{ers} = K_{lin} \mathbf{u}$. Um unter der Annahme linearen Materialverhaltens (lineare Steifigkeit) eine derartige Beul- bzw. Knickverformung zu verursachen, sind jedoch extrem große Kräfte bzw. Momente notwendig. D.h. die für die Optimierung berechneten Ersatzlasten sind in diesem Fall unverhältnismäßig groß.

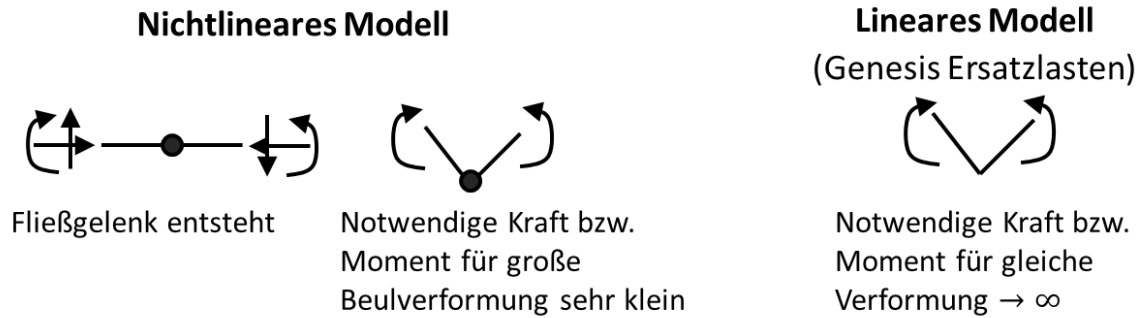


Abbildung II.1.2.16 notwendige Kraft bzw. Moment für Beulverformung im linearen und nichtlinearen Modell

Das lineare, gradientenbasierte Optimierungsprogramm Genesis bietet eine vielfältige Auswahl an Zielfunktionen und Nebenbedingungen und ist dadurch sehr flexibel in der Anwendung. Darüber hinaus ist die ESL-Methode nicht auf Topologieoptimierungen beschränkt, sondern kann auch für Topometrie- oder Sizing-Optimierungen eingesetzt werden.

Bei der ESL-Methode werden Nebenbedingungen deterministisch erfüllt. Allerdings sind die Nebenbedingungen im linear statischen Optimierungsmodell definiert. Nebenbedingungen auf Basis von dynamischen oder nichtlinearen Größen, z.B. Beschleunigungen, HIC-Wert oder plastische Dehnungen sind ohne weiteres nicht möglich. Es sind dafür näherungsweise plausible lineare Ersatzgrößen zu definieren.

Aufgrund der Komplexität der Methode und der Vielfältigkeit des Optimierungsprogramms Genesis kann die Anwendung der ESL-Methode nur Nutzern mit ausreichenden Kenntnissen der (gradientenbasierten) Optimierung, impliziter und expliziter Analysen empfohlen werden. Entsprechende Schulungen werden von DYNAMore angeboten.

Die momentan noch erfolgende Implementierung der Möglichkeit, Elemente sehr geringer Dichte zu löschen, wird die Methode weiter verbessern. Die Implementierung der Schnittstelle `dyna2nastran.py` ermöglicht die Anwendbarkeit der Methode auf reale Crash-Modelle.

Vergleich beider Methoden:

Beide Methoden sind für Topologieoptimierungen bei nichtlinearen Beanspruchungen geeignet. Für die im Projekt beabsichtigte Anwendung auf crash-beanspruchte Fahrzeugstrukturen mit dem Optimierungsziel maximaler Energieabsorption, ist die ESL-Methode zu bevorzugen.

Ein direkter Vergleich von Optimierungsergebnissen beider Methoden ist wenig sinnvoll. Die Optimierung mit Genesis/ESL ist gradientenbasiert und vielfältige Zielfunktionen können gewählt werden. Die HCA-Methode dagegen ist heuristisch und die Zielfunktion: „Homogenisierung der Inneren Energiedichte“ steht fest.

Eine generelle Aussage bezüglich der Effizienz, d.h. welche der Methoden weniger Rechenzeit benötigt, ist nicht möglich. Die HCA-Methode bedarf i.A. ca. 30 Iterationen, d.h. 30 nichtlinear dynamischer Systemanalysen zur Konvergenz. Die ESL-Methode bedarf i.A. ca. 5-8 ESL-Iterationen, d.h. 5-8 nichtlinear dynamischer Systemanalysen und entsprechend 5-8 lineare gradientenbasierte Multilastfalloptimierungen. Die Multilastfalloptimierungen sind wiederum ein iterativer Prozess, wobei die Systemsensitivitäten berechnet werden müssen, was einer impliziten LU-Zerlegung (Faktorisierung) bedarf.

Für eine HCA-Optimierung sind ausschließlich die explizit dynamischen Systemanalysen für den Rechenzeitbedarf ausschlaggebend. Für die ESL-Methode sind zwar weniger dieser Systemanalysen notwendig, dafür nehmen die linearen Optimierungen zusätzlich Rechenzeit in Anspruch. Welche Methode letztendlich eine geringere Gesamt-Rechenzeit aufweist, hängt von der Anzahl der Freiheitsgrade im Entwurfsraum, der Gesamtanzahl an Freiheitsgraden im System, dem kritischen Zeitschritt für die expliziten Analysen, dem in den dynamischen Analysen betrachteten Zeitraum und den vorhandenen Rechenplattformen ab.

Gemeinsamkeiten:

Bei biegedominanten Beanspruchungen eines zu optimierenden Trägers kommt es, je nach Zielfunktion, mehr oder weniger zu Materialanlagerungen auf der Druck- und Zugseite des Trägers. Im Bereich der neutralen Faser werden Stege unter Umständen nicht vollständig ausgebildet, es kann zu zerrissenen Topologien kommen.

Die Interpretation der optimierten Topologien bedarf unbedingt der Begutachtung eines Ingenieurs oder Konstrukteurs und kann nicht ausschließlich automatisiert erfolgen. Für beide Methoden stellten wir fest, dass es im Allgemeinen nicht zielführend ist, mit den tatsächlich gewünschten Massen als Nebenbedingung zu arbeiten. Es empfiehlt sich, als Nebenbedingung mindestens 20 - 30 % Masse zu wählen, u.a. damit sich Stege ausbilden können. Da die Topologieoptimierung die unterste Stufe des Optimierungsprozesses darstellt, ist dies durchaus zu rechtfertigen.

Das Ausbilden von Topologien mit Zwischendichtezuständen kann ein Zeichen dafür sein, dass eine Verfeinerung des Netzes notwendig ist.

Methodische Grundlagenuntersuchungen

Im Lauf der Voroptimierungen erachteten wir die nähere Untersuchung folgender Punkte als notwendig.

Kritischer Zeitschritt

Die Frage, ob der kritische Zeitschritt mit Verringerung der Dichte in einzelnen Elementen nicht sehr klein wird, und dadurch die Rechenzeiten der dynamisch expliziten Analysen extrem anwachsen, wurde im Vorfeld und im Laufe des Projekts mehrfach an uns herangetragen. Diese Frage hat folgenden Hintergrund:

Im Zuge einer Topologieoptimierung wird die Dichte in den einzelnen finiten Elementen im Entwurfsraum verändert. In Elementen, die für die optimale Topologie irrelevant sind, strebt die Dichte zunehmend gegen Null. Sowohl bei der HCA- als auch der ESL-Methode sind im Ablauf des Optimierungsprozesses dynamisch explizite Analysen des Modells mit der aktuellen Dichteverteilung notwendig. Bei expliziten Analysen darf der Zeitschritt, für den in dem betrachteten dynamischen Prozess die unbekanntenen Knotengrößen berechnet werden (Knotenbeschleunigungen, und daraus die Knotengeschwindigkeiten und Knotenverschiebungen) einen kritischen Wert nicht überschreiten. Ansonsten ist das

Berechnungsverfahren nicht mehr stabil. Je kleiner der kritische Zeitschritt ist, desto länger ist die Rechenzeit zur Durchführung der Analyse. Der kritische Zeitschritt Δt_{krit} hängt unter anderem von der Dichte ab.

Es ist $\Delta t_{krit} \sim \frac{L\sqrt{\rho}}{\sqrt{E}}$. Hierbei ist L die maßgebliche Elementkantenlänge der Diskretisierung, E der E-Modul des Materials und ρ die Rohdichte des Materials. Nach dem SIMP-Ansatz für die Materialparametrisierung ist $E(\rho_{rel}) = (\rho_{rel})^p E_0$. Damit folgt für den kritischen Zeitschritt:

$\Delta t_{krit} \sim \frac{L\sqrt{\rho_{rel}\rho_0}}{\sqrt{E_0(\rho_{rel})^p}} = \frac{L\sqrt{\rho_0}}{\sqrt{E_0}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{rel}}}{\sqrt{(\rho_{rel})^p}}$. Der vordere Term $\frac{L\sqrt{\rho_0}}{\sqrt{E_0}}$ ist der kritische Zeitschritt des

Ausgangsmaterials mit voller Dichte. Für den zweiten Term gilt: $\frac{\sqrt{\rho_{rel}}}{\sqrt{(\rho_{rel})^p}} > 1.0$, da der Exponent

$p > 1.0$ ist. Somit wird durch die Verringerung der Dichte in einzelnen Elementen im Laufe des Optimierungsprozesses der kritische Zeitschritt nicht kleiner werden. Es kann sich lediglich durch die Deformation die Elementkantenlänge L verringern, und dadurch der kritische Zeitschritt verringern. Das ist jedoch generell bei explizit dynamischen Analysen der Fall und kann beispielsweise durch Massenskalierung verhindert werden.

Es ist also nicht zu befürchten, dass die Rechenzeiten zur Durchführung der Analysen im Laufe der Optimierung anwachsen werden.

Notwendige Netzfeinheit

Für Topologieoptimierungen wird der gesamte Entwurfsraum mit Volumenelementen (solids) vernetzt, die generell sehr rechenzeitintensiv sind. Daher ist es sinnvoll, vor der Durchführung der Optimierungen zu untersuchen, welche Elementkantenlänge für die Vernetzung des Entwurfsraums verwendet werden soll. Das Netz soll so fein sein, dass die Analyseergebnisse ausreichend genau sind, jedoch nicht feiner. In unserem Fall soll das Beulen eines sich im Lauf der Topologieoptimierung bildenden Steges wiedergegeben werden können.

Darüber hinaus ist zu klären, welche Elementformulierung (Ansatz der Verschiebungen im Element, Anzahl der Integrationspunkte im Element) gewählt wird. Standard für Simulationen mit LS-DYNA ist die Verwendung von trilinearen Ansatzfunktionen im solid-Element. Unterintegrierte Elemente mit nur einem Integrationspunkt in Verbindung mit Hourglass-Stabilisierungen sind zwar sehr effizient und robust, jedoch nicht in der Lage, einen Spannungsverlauf im Element abzubilden. Da die Untersuchung hier darauf abzielt, möglichst

wenig Elemente zu verwenden - das bedeutet auch, möglichst wenig Elemente über einen sich in der Topologieoptimierung herausbildenden Steg zu haben - ist es erforderlich, vollintegrierte Elemente mit 2x2x2 Integrationspunkten zu verwenden, siehe Abbildung II.1.2.17. So kann ein Spannungsverlauf im Element wiedergegeben werden.

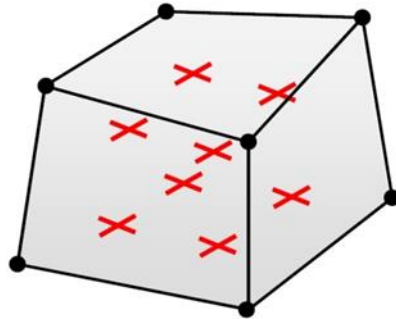


Abbildung II.1.2.17: vollintegriertes Element mit 2x2x2 Integrationspunkten

Zur Untersuchung der notwendigen Netzfeinheit für das Abbilden von Stegbeulen wird folgendes Modell betrachtet, siehe Abbildung II.1.2.18:

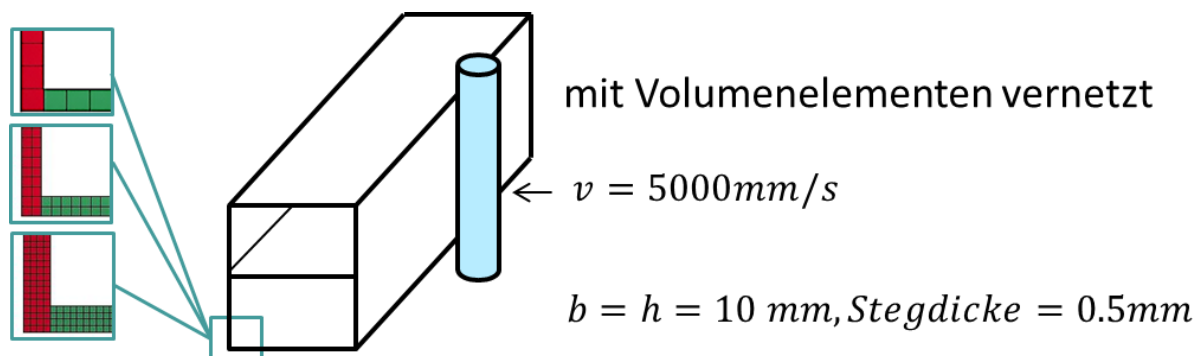


Abbildung II.1.2.18: Hohlkastenträger in Pfahlaufprall

Ein Pfahl prallt auf einen Hohlkastenträger, ein Extrusionsprofil mit einem Steg im Querschnitt. Der Hohlkastenträger ist mit solid-Elementen vernetzt, zur Durchführung einer Konvergenzstudie vergleichsweise mit einem, zwei und vier solids über die Stegdicken. Die feinste Vernetzung mit vier Elementen über die Dicke wird hierbei als Referenzlösung betrachtet. In Abbildung II.1.2.19 sind die jeweiligen Systemantworten als Kontaktkraft-Intrusions-Verschiebungsdiagramm dargestellt.

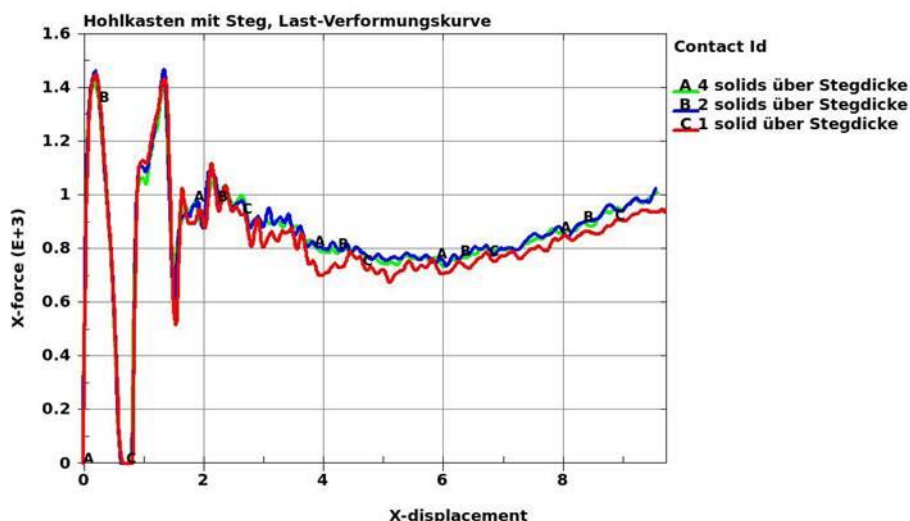


Abbildung II.1.2.19: Last-Verformungskurve Hohlkenträger

Die zugehörigen plastischen Dehnungen und Deformationen sind vergleichsweise für ein Element und vier Elemente über die Stegdicke in Abbildung II.1.2.20 dargestellt.

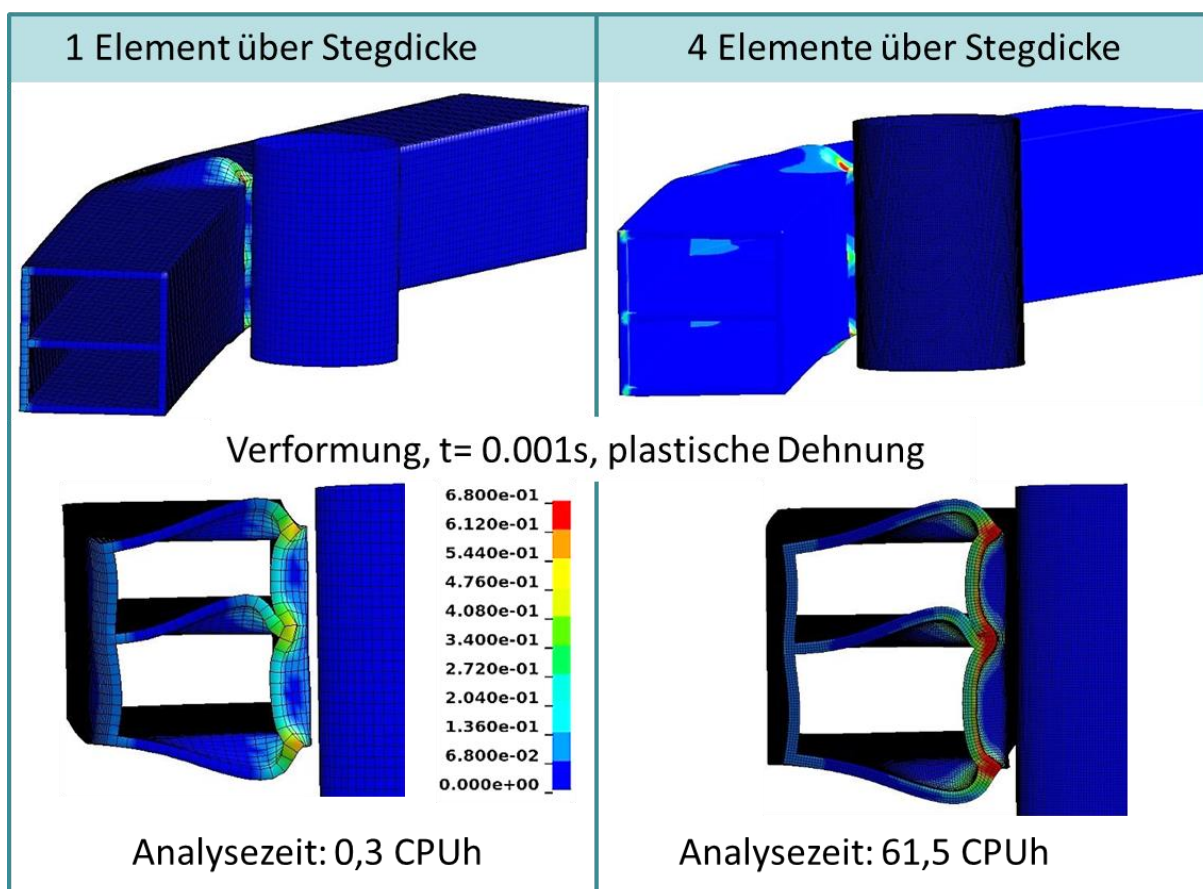


Abbildung II.1.2.20: Vergleich Hohlkenträger mit einem Element und vier Elementen über die Stegdicke

Sowohl an der Systemantwort, als auch an den Deformationen und plastischen Dehnungen, die das lokale Verhalten zeigen, ist zu erkennen, dass bereits bei einem Volumenelement über die Dicke die Ergebnisse sehr gut mit der Referenzlösung mit vier Elementen über die Stegdicke übereinstimmen. Dies ist ein sehr positives Resultat im Hinblick auf die durchzuführenden Topologieoptimierungen. Demnach ist eine Vernetzung des Entwurfsraums mit Elementkantenlängen im Bereich der erwünschten Stegdicken ausreichend. In diesem Projekt sollen die Stegdicken der zu optimierenden Schweller im Bereich von 1,6-3,5 mm liegen, somit arbeiten wir mit Vernetzungen im 2mm-Bereich.

Einfluss von Elementen sehr geringer Dichte

Bei Topologieoptimierungen bilden sich Dichteverteilungen mit möglichst eindeutigen Null- oder Eins-Dichten, d.h. entweder „kein Material“ oder „volles Material“ heraus. Zwischendichtezustände in der optimierten Topologie sind unerwünscht, da diese einem fiktiven, in Realität nicht vorhandenen Material entsprechen. Dieses Herauskristallisieren von klaren 0- oder 1-Topologien wird durch den oben erwähnten SIMP-Ansatz gewährleistet. Für die Topologieoptimierung stellt sich dann die Frage, wie mit Elementen umgegangen wird, deren relative Dichte ρ_{rel} gegen Null strebt. Verbleiben diese im Analysemodell oder haben sie einen verfälschenden Einfluss auf die Analyseergebnisse. Zur Klärung dieser Frage wird folgendes Modell betrachtet (Abbildung II.1.2.21):

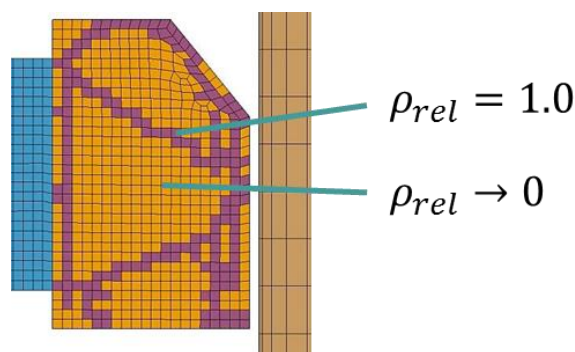


Abbildung II.1.2.21: Extrusionsträgers unter Pfahlaufprall-Belastung

Es handelt sich um eine optimierte Topologie eines Extrusionsträgers unter Pfahlaufprall-Belastung mit dem Ziel maximaler Steifigkeit. Es hat sich ein Hohlkastenträger mit 2 Stegen als optimale Topologie eingestellt. Die Elemente zwischen diesen Stegen haben eine relative Dichte von nahezu Null.

Dieses Modell wird für den Lastfall Pfahlaufprall analysiert, einmal mit den Elementen, deren Dichte nahezu Null ist, und einmal werden diese Elemente aus dem Analysemodell gelöscht, siehe Abbildung II.1.2.22.

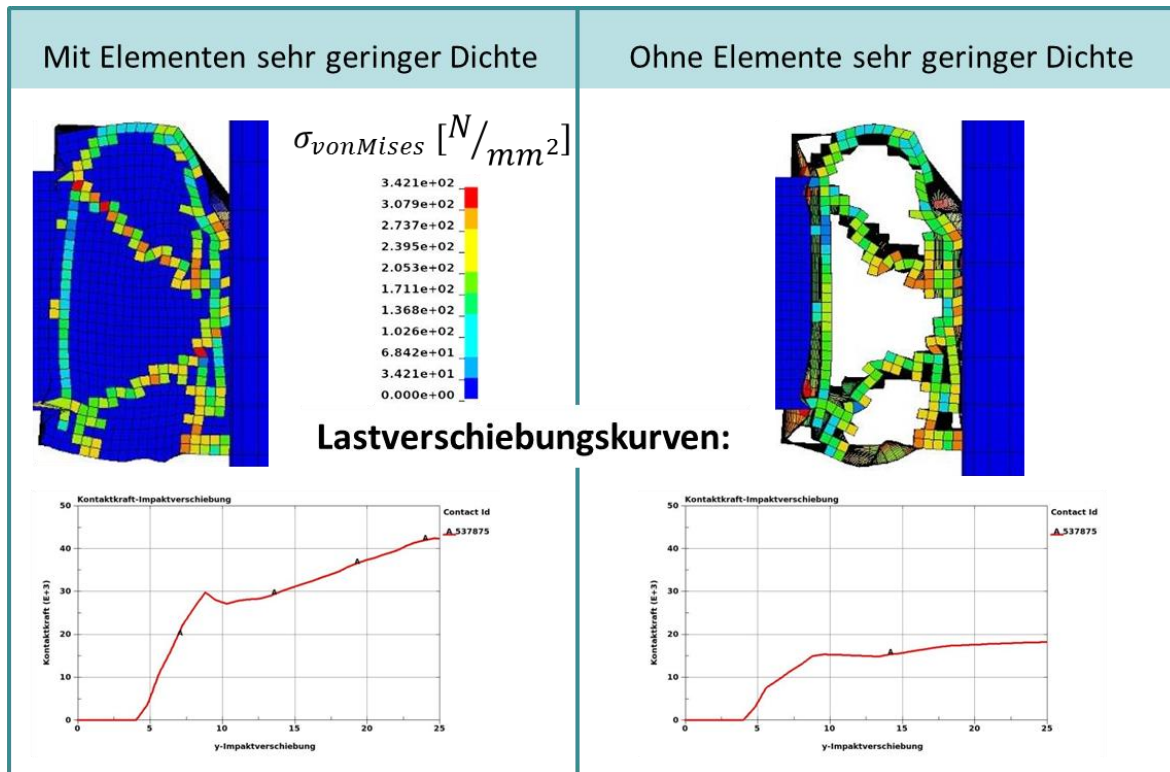


Abbildung II.1.2.22: Extrusionsträgers unter Pfahlaufprall-Belastung mit und ohne Elemente geringer Dichte

Sowohl an den Verformungen unter Pfahlaufprall als auch an den Kontaktkraft-Intrusionsverschiebungskurven ist zu erkennen, dass die Elemente, deren Dichte nahezu Null ist, hier einen deutlich versteifenden Einfluss haben. Im Modell mit gelöschten Null-Dichte-Elementen (Abbildung II.1.2.22, rechts) knicken die Stege unter der Beanspruchung und die maximale Kontaktkraft sind 19 kN. Verbleiben diese Elemente dagegen im Analysemodell (Abbildung II.1.2.22, links) wird hier das Knicken der Stege verhindert und die Kontaktkraft steigt auf 43 kN. Grund dafür ist, dass das Null-Dichte-Material hier durch die umgebenden Stege in einer Art „Kammer“ eingeschlossen ist und bei von Mises Plastizität das plastische Fließen des Materials volumenerhaltend ist. D.h. das eingeschlossene Material, das keine Dichte und somit keine Steifigkeit hat, kann dennoch durch seine volumenerhaltende Eigenschaft eine unerwünschte, versteifende Wirkung auf das Analyseergebnis haben. Darüber hinaus können Null-Dichte-Bereiche durch ihre sehr geringe Steifigkeit zu numerischen Problemen bei der Analyse führen.

Es ist also wünschenswert, dass diese Bereiche, deren Dichte im Laufe der Optimierung gegen Null strebt aus dem dynamisch expliziten Analysemodell gelöscht werden können. Diese Elemente sollen aber im Laufe der fortschreitenden Optimierungsiterationen wieder mit in die Topologie aufgenommen werden können.

Für implizite Analysen bzw. die implizite LU-Zerlegung/ Berechnung der Sensitivitäten bei der linearen gradientenbasierten Optimierung mit Genesis dagegen sollen diese Null-Dichte-Elemente im Modell verbleiben, ansonsten würden zerrissene Topologien zu singulären Steifigkeitsmatrizen führen.

Für die HCA-Methode ist die Möglichkeit, die Elemente sehr geringer Dichte aus dem dynamisch expliziten Analysemodell automatisiert zu entfernen bereits implementiert. Durch die Mittelung der inneren Energiedichte über einen gewissen Elementbereich können gelöschte Elemente im Zuge der Optimierungsiterationen auch wieder aktiviert werden und eine relative Dichte > 0 bekommen.

Für die ESL-Methode wird die Möglichkeit, die Elemente sehr geringer Dichte aus dem dynamisch expliziten Analysemodell zu entfernen als Folge des Projekts implementiert. Mit der Implementierung wurde bereits während des Projektes begonnen.

Wichten von Lastfällen / ESL: Wie viele Ersatzlastzustände sinnvoll

Sowohl für die HCA- als auch für die ESL-Methode stellt sich die Frage, wie die dynamischen (Crash-) Lastfälle im Vergleich zu statischen Lastfällen gewichtet werden. Es empfiehlt sich zunächst eine Optimierung für die einzelnen Lastfälle und anschließende Analyse der jeweiligen optimalen Struktur durchzuführen und die Formänderungsenergien auszuwerten. Für die Multilastfalloptimierung sollten die einzelnen Lastfälle dann entsprechend den jeweiligen Energien gewichtet werden.

Für die ESL-Methode stellt sich zusätzlich die Frage: Wie viele Ersatzlastzustände sind zu betrachten und wie sind sie zu wichten?

Da die Faktorisierung für die Optimierung mit Genesis für alle Lastfälle nur einmal erfolgen muss, benötigt das Optimieren für mehr Ersatzlastzustände nur unwesentlich mehr Rechenzeit. So könnte man meinen, die Optimierung wird umso genauer, je mehr Ersatzlastzustände gewählt werden. Tatsächlich werden jedoch die Topologieergebnisse umso diffuser (mehr Zwischendichtezustände), je mehr Lastfälle in die Optimierung einfließen. D.h. unseren Erfahrungen nach sind 3 - 8 Ersatzlastzustände sinnvoll.

Die Defaulteinstellung normiert die einzelnen Lastfallbeiträge auf die Werte der 0. Designiteration. Bei gleicher Wichtung (1.0) wird dann allen Lastzuständen gleich viel Rechnung getragen.

Demonstrator der Prozesskette

Für die Demonstration der von den Projektpartnern erarbeiteten Prozesskette haben die Projektpartner folgendes „Prozesskettenmodell“ gewählt, siehe Abbildung II.1.2.23.

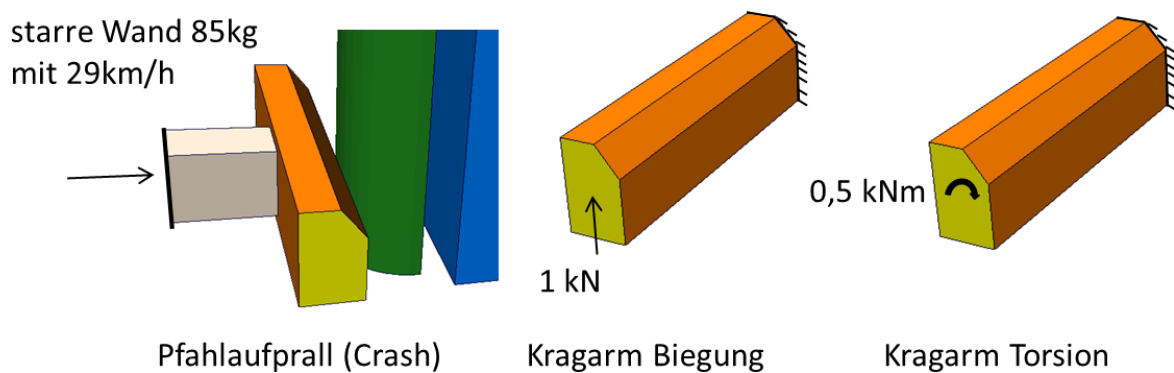


Abbildung II.1.2.23: Prozesskettenmodell und Lastfälle

Ein Schweller mit den Abmessungen (600mm x 100mm x 160mm) aus Aluminium soll für die drei Lastfälle Pfahlaufprall mit 29 km/h, statische Biegung und statische Torsion optimiert werden. Optimierungsziel ist hierbei für den Lastfall Crash, dass die Kontaktkraft < 40 kN ist, der Kontaktkraftverlauf möglichst gleichmäßig ist und dabei die Intrusion < 70 mm bleibt. Für den Lastfall Biegung soll die maximale Durchbiegung < 0,3867 mm sein und für den Lastfall Torsion die maximale Verdrehung < $3.554 \cdot 10^{-3}$ rad. Der Schweller soll als Extrusionsprofil mit Stegdicken im Bereich zwischen 1,6mm und 3,5 mm gefertigt werden. Am Ende des Optimierungsprozesses soll die Masse des Trägers < 2,8 kg sein.

Optimierungsergebnis der HCA-Methode:

Mit der Zielfunktion „Homogenisierung der inneren Energiedichte“, der Massen-nebenbedingung 25% und der Verschiebungs-nebenbedingung: Intrusion < 70 mm lieferte die HCA-Methode für die Optimierung des Crash-Lastfalls die in Abbildung II.1.2.24 dargestellte Topologie, die an SFE zur Interpretation als Schalenstruktur mittels Mustererkennung übergeben wurde. Es entsteht ein Hohlkastenträger mit einer Stegverstärkung in der Mitte des

Hohlkastens und - zur Aufnahme der Impaktbeanspruchungen - mit Verstärkungen auf der Pfahlseite und der dem Pfahl gegenüberliegenden Seite, d.h. auf der Zug- und Druckseite infolge der Beanspruchung.

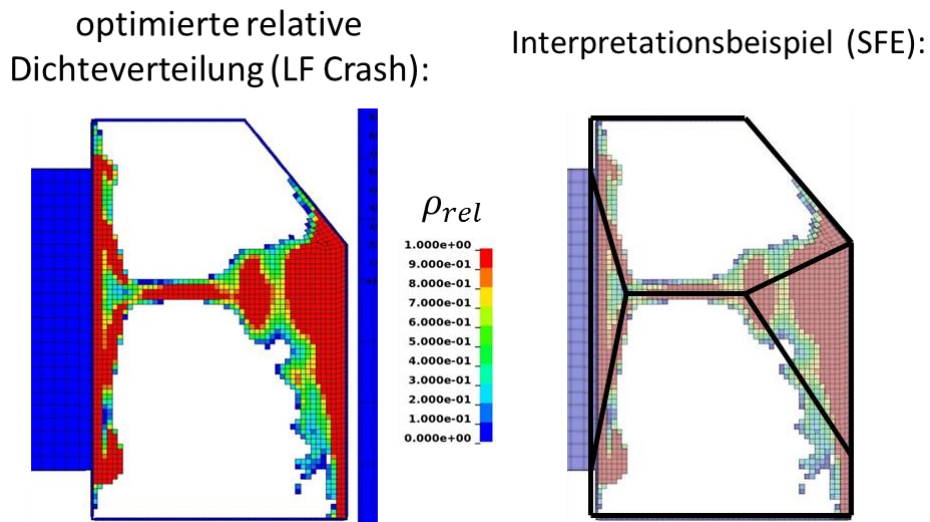


Abbildung II.1.2.24: Ergebnis der HCA Optimierung sowie Interpretationsbeispiel (SFE)

Die Optimierung konvergierte mit 28 Iterationen, siehe Abbildung II.1.2.25, links. Die optimierte Topologie weist eine maximale Intrusion von 8.5 mm auf, die maximale Kontaktkraft beträgt 355 kN, Abbildung II.1.2.25, rechts.

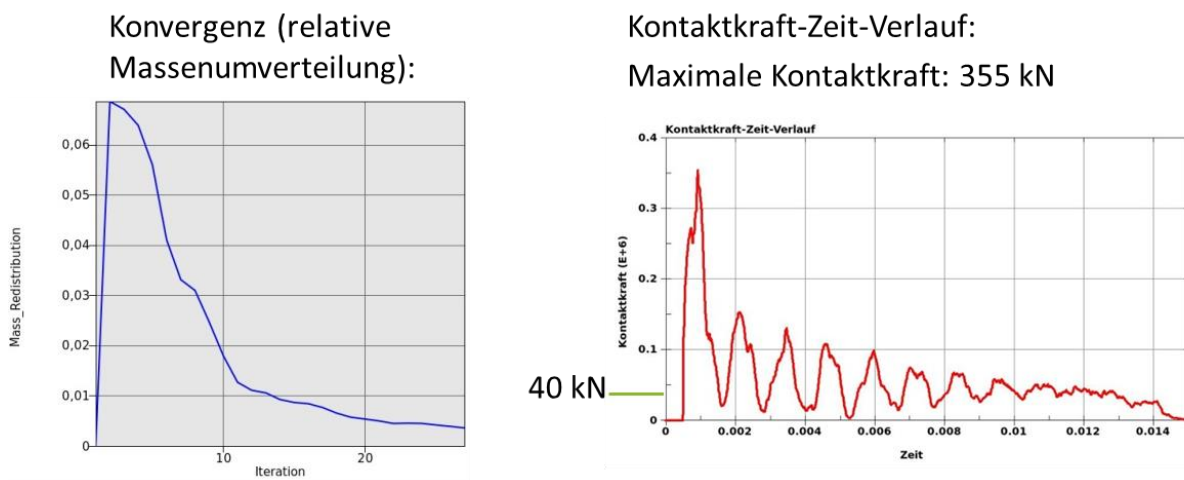


Abbildung II.1.2.25: Konvergenzverhalten der HCA Methode für das Prozesskettenmodell

Die optimierte Struktur ist damit deutlich steifer als erwünscht. Es ist jedoch zu erwarten, dass sich eine daraus interpretierte Schalenstruktur deutlich weicher verhalten wird. Die HCA liefert entsprechend ihrer Zielfunktion eine Topologie mit optimaler Materialausnutzung und kann den hier gewünschten Optimierungszielen daher nicht entsprechend Rechnung tragen.

Als Diskretisierungsvariante wurde dieselbe Optimierung mit einer 5mm Diskretisierung durchgeführt, die optimierte Topologie und das Konvergenzverhalten hierzu ist in Abbildung II.1.2.26 zu sehen.

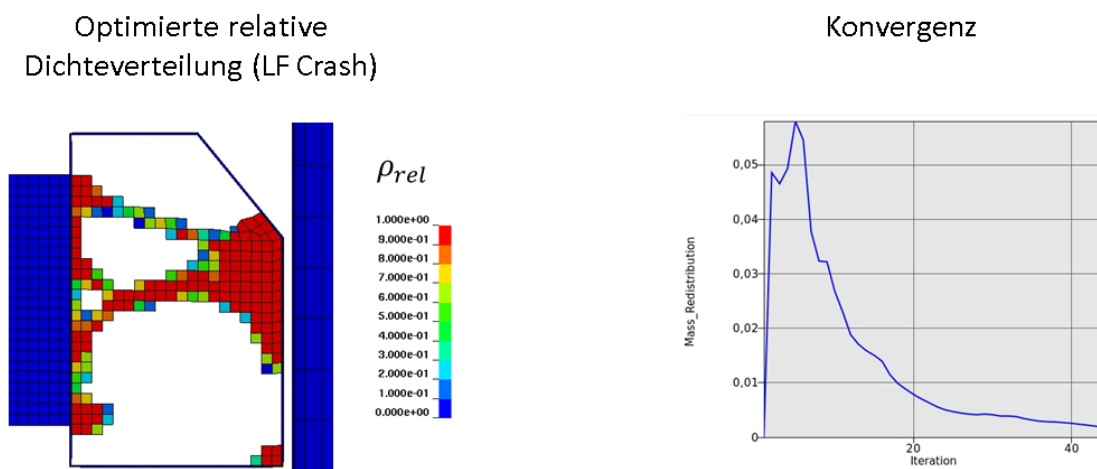


Abbildung II.1.2.26: Konvergenzverhalten der HCA Methode für das Prozesskettenmodell (5mm Diskretisierung)

Es bildet sich hier ein Hohlkastenträger mit zwei Stegen und Verstärkungen auf der Biegedruck- und Biegezugseite heraus, wobei der obere Steg nur eine relative Dichte von ca. 0.4 aufweist, d.h. von untergeordneter Bedeutung im Vergleich zum unteren Steg mit relativer Dichte von 1.0 ist. Offensichtlich ist das Optimierungsergebnisses von der gewählten Netzfeinheit abhängig, konvergiert jedoch mit zunehmender Verfeinerung.

Optimierungsergebnis der ESL-Methode:

Das Prozesskettenmodell wurde mit der Zielfunktion „maximale innere Energie“ für die Crash-Ersatzlastfälle (10 ausgewählte Zeitschritte) und der Zielfunktion „minimale innere Energie“ für die Lastfälle Biegung und Torsion bei einer jeweiligen Wichtung der 12 Lastfälle von 1.0 optimiert. Als Nebenbedingung wurde eine relative Masse von 30% vorgegeben. Für den Lastfall Crash wurden Verschiebungsnebenbedingungen eingeführt, um die maximale Intrusion

von 70mm einzuhalten. Für die Lastfälle Biegung und Torsion wurden die oben angegebenen maximale Verschiebung und Verdrehungen als Nebenbedingungen vorgegeben. Die optimale Dichteverteilung (Topologie) ist in Abbildung II.1.2.27 dargestellt, sie wurde als alternatives Ausgangsmodell für die Prozesskette an SFE übergeben.

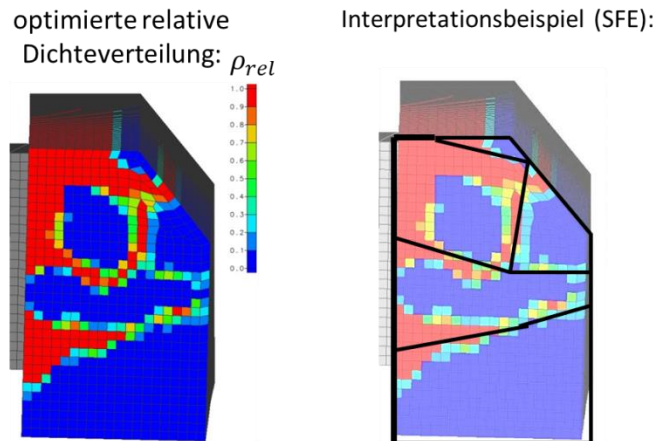


Abbildung II.1.2.27: Ergebnis der ESLM Optimierung sowie Interpretationsbeispiel (SFE)

Es entsteht ein Hohlkastenträger (äußere Schalenberandung hier nicht dargestellt) mit einem Steg im oberen Bereich und einem zusätzlichen Steg im unteren Querschnittsbereich. Diese Struktur scheint geeignet, gewisse Deformationen zur Crash-Absorption zuzulassen, dann jedoch durch den Steg und den im linken Bereich des Hohlkastens kräftigen unteren Steg, die Deformation zu begrenzen.

Die Deformationen und plastischen Dehnungen sowie der zeitliche Verlauf der Kontaktkraft der zugehörigen Analyse dieser Topologie sind in Abbildung II.1.2.28 und Abbildung II.1.2.29 dargestellt.

Analyseergebnisse optimierte Topologie: Maximale Intrusion: 67,1 mm

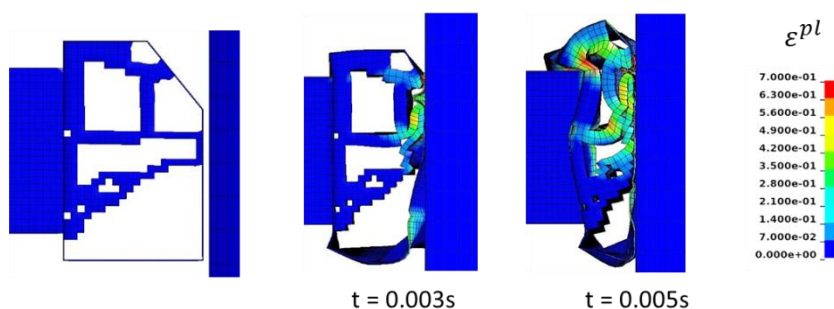


Abbildung II.1.2.28: Analyseergebnisse optimierte Topologie

Die maximale Intrusion von 67,1 mm hält die geforderte Nebenbedingung (Intrusion < 70 mm) ein, die maximale Kontaktkraft liegt hier bei 41,1 kN, also sehr nah an der geforderten Grenze von 40 kN.

Kontaktkraft-Zeit-Diagramm: (maximale Kontaktkraft: 41,1 kN)

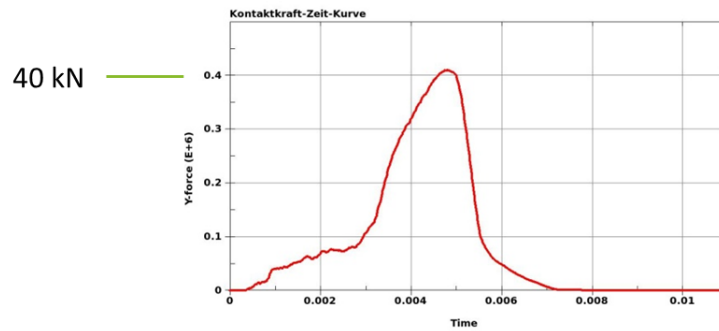


Abbildung II.1.2.29: Kontaktkraft-Zeit-Diagramm

Diese Topologie erfüllt die Optimierungsvorgaben sehr gut und dient als Ausgangspunkt für die weiteren Schritte der Prozesskette.

II.1.3 Wissenschaftlich - technische Ergebnisse – SFE (1. Teil)

Aus dem Ergebnis der Analyse der topologischen und geometrischen Charakteristika der in der Praxis eingesetzten Strangpressprofile und deren Querschnitte, konnten generische Grundmuster dieser typischen Querschnitte ermittelt und programmtechnisch umgesetzt werden. Die Algorithmen und deren programmtechnische Umsetzung zur Überlagerung dieser generischen Muster wurden dem generischen Musterkatalog unterlegt. Weiterhin sind diese Grundmuster in die Optimierungsschleife zum Aufbau diskreter und kontinuierlicher Designänderungen eingebunden worden. Eine diskrete Designänderung bedeutet hierbei, die Überlagerung eines oder mehrerer generischer Grundmuster in eine neue Topologie. Die Herausforderung hierbei ist die automatische Bestimmung der durch die Überlagerung entstehenden neuen Topologien. Jedes neue „überlagerte Muster“ kann durch kontinuierliche Designvariablen gesamt und/oder partiell in seiner Geometrie verändert werden. Die gewünschten Änderungen können in Designrecords abgelegt werden, um einer durchgehenden Optimierungsschleife zugänglich zu sein. Restriktionen, wie z.B. eine äußere vorgegebene, veränderbare oder starre Berandung sind ebenfalls parametrisch erfasst und werden in der automatischen Topologiebestimmung mit berücksichtigt. Somit ist sowohl der Bauraum als auch der Designraum, der sich per Definition maximal bis zum Bauraum „ausweiten“ darf, implizit parametrisch beschrieben.

Aus der topologischen Vorooptimierung mittels ESLM und HCA-Methode ergeben sich Materialverteilungen, deren Informationsgehalt bezüglich Querschnitts-Topologie erkannt und in „fertigbare“ Strukturvorschläge umgesetzt werden muss. Die Algorithmen zur Erkennung der Topologien sind entwickelt worden und werden über Benutzerinterfaces nach Entwurfskriterien ausgewertet. Nach Zuordnung der Topologie und der Strukturquerschnitte können 3-dimensionale Geometrien aufgebaut werden und nachfolgend deren Diskretisierung in Schalenelemente erfolgen.

Abbildung II.1.3.1 zeigt den Prozess aus einem ESLM/HCA-Ergebnis zu einem Querschnitt in SFE CONCEPT. Bei der Filterung und Topologieerkennung kann der Benutzer durch Optionen (Abstände der Verbindungspunkte/Stege, Winkel der Stege, Max. Anzahl sich treffender Stege, usw.) einen geeigneten Vorschlag automatisch generieren und auswählen.

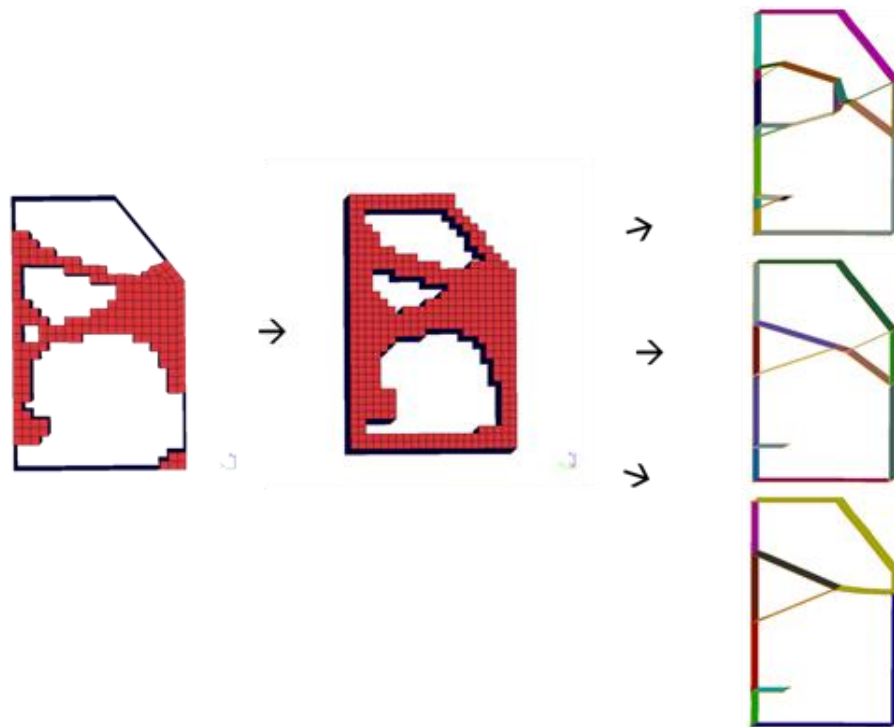


Abbildung II.1.3.1: Filterung/Topologieerkennung in SFE CONCEPT

Abbildung II.1.3.2 zeigt die mit dem ausgewählten Querschnitt in SFE CONCEPT unmittelbar zur Verfügung stehende 3D-Geometrie und das daraus mit dem integrierten Vernetzer erzeugte FE-Modell.

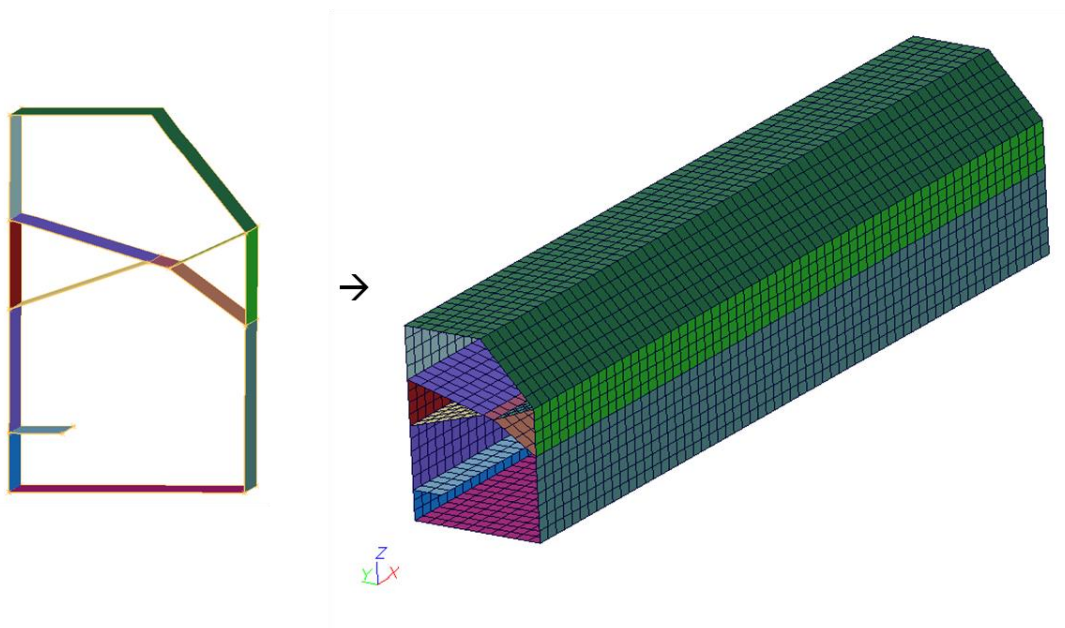


Abbildung II.1.3.2: 3D-FE-Modell in SFE CONCEPT

Abbildung II.1.3.3 und Abbildung II.1.3.4 zeigen den Prozess an weiteren Beispielen.

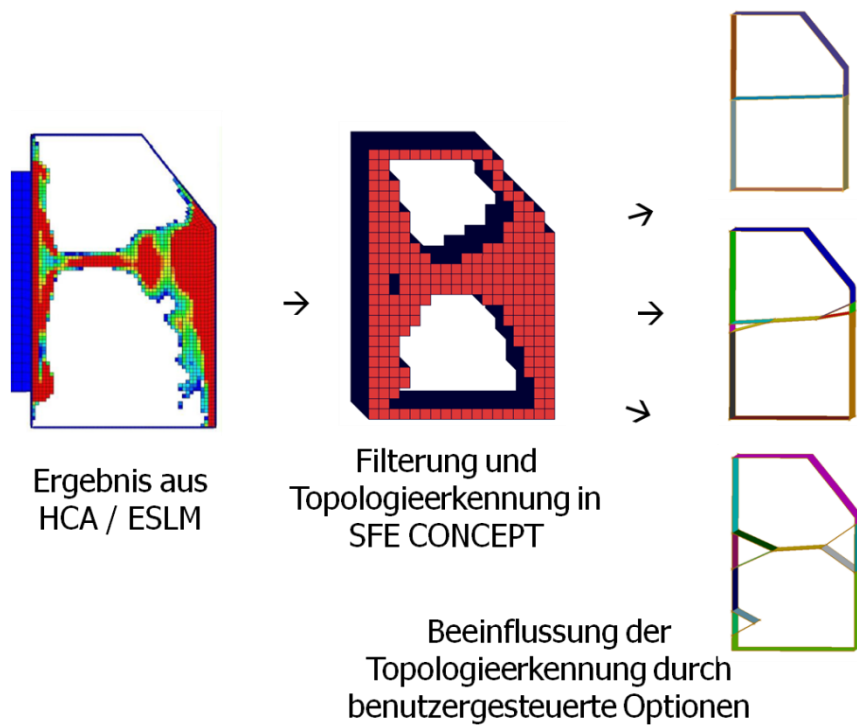


Abbildung II.1.3.3: Filterung/Topologieerkennung in SFE CONCEPT

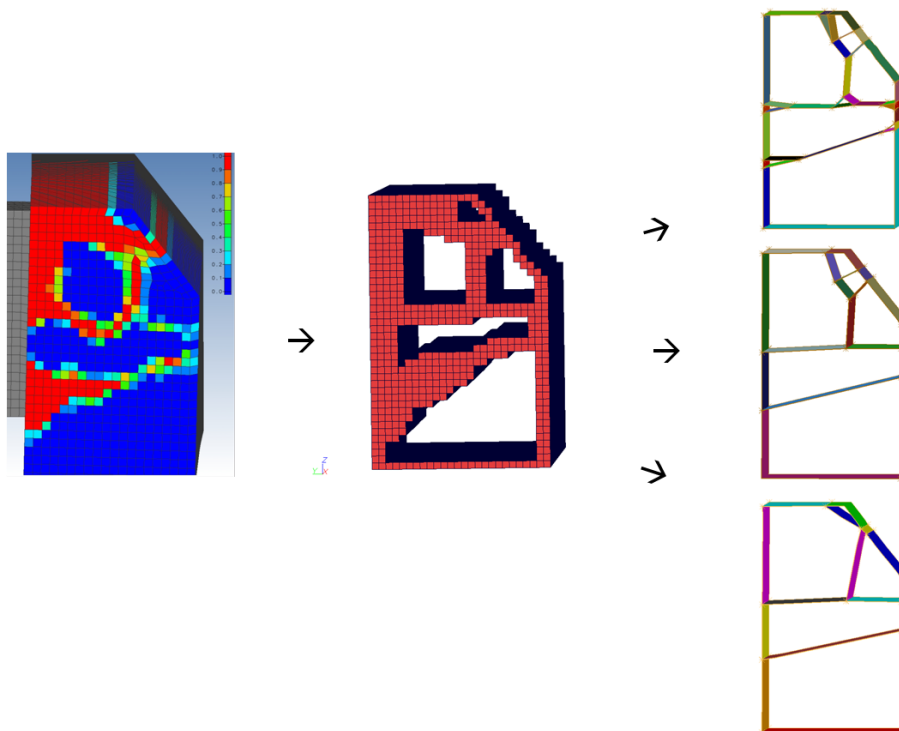


Abbildung II.1.3.4: Filterung/Topologieerkennung in SFE CONCEPT

Ein wichtiger Bestandteil der topologischen und geometrischen Gestaltung von Aussteifungen und/oder energieabsorbierenden Zellen in Profilen crashbeanspruchter Balkengebiete (z.B. Schweller) in der Fahrzeugstruktur ist die Kenntnis deren Gestaltungslogik. Die Gestaltungslogik ist von vielen Kriterien abhängig. Nicht zuletzt auch von Fertigungskriterien. Die Logik kann z.B. heuristischen Regeln folgen. Wichtig ist jedoch, die Gestaltungslogik abstrakt durch Nutzung generischer Grundmuster und deren Überlagerung in einem digitalen und automatisierten Auslegungsprozess unterstützen zu können. Dadurch kann ein Auslegungsprozess Ergebnis einer „automatisierten“ Optimierung sein.

In Abbildung II.1.3.5 ist das Verfahren der Erzeugung von Geometrien durch Muster-Überlagerung dargestellt.

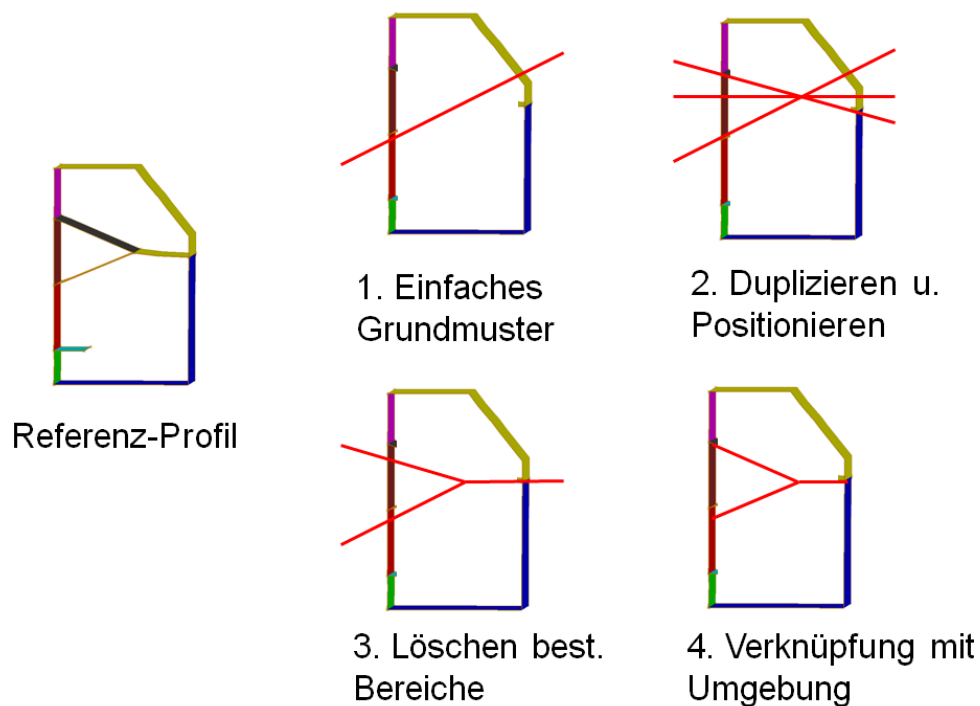


Abbildung II.1.3.5: Musterüberlagerung

In der unten gezeigten Sequenz (Abbildung II.1.3.6) sind die automatisch generierten Zustände der Überlagerung zweier Grund-Mustertypen dargestellt. Hierbei wird das Grundmuster „Kreis“ über eine kontinuierliche Designvariable (y-Position) über die äußere Berandung des Designraums geschoben und mit dem Grundmuster „Stern“ verschnitten. Die Elemente in der

Kreis-Innenfläche sind vom Benutzer „inaktiv“ gesetzt. Es ist zu erkennen, dass zu jeder kontinuierlichen Designänderung ein ein-eindeutiger topologischer und geometrischer Zustand „automatisch“ als Ergebnis der Überlagerung erzeugt werden kann.

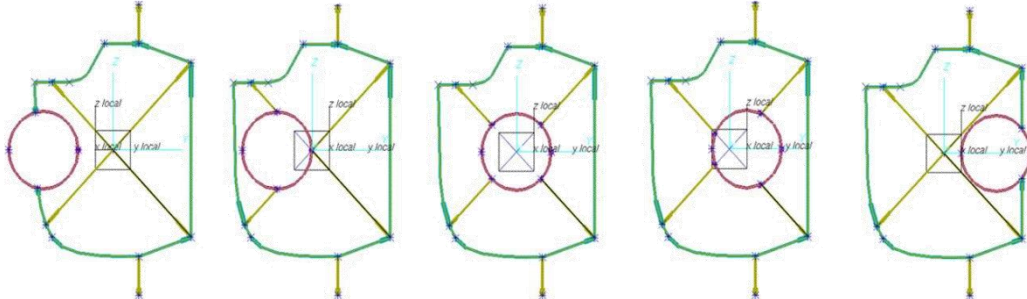
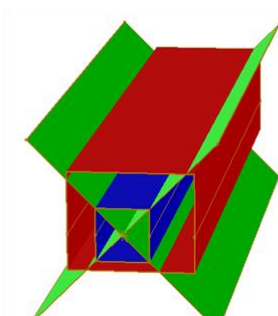


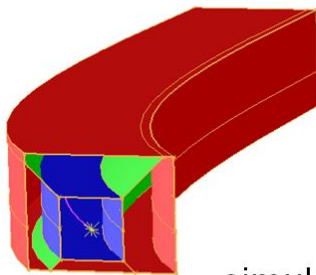
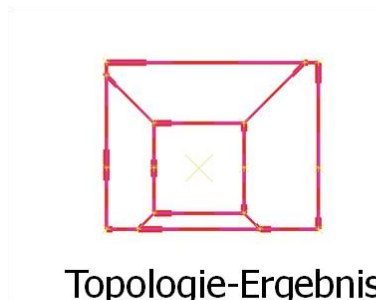
Abbildung II.1.3.6: Generierung eines Profils durch Überlagerung einfacher Grundmuster

In Abbildung II.1.3.7 ist die Überlagerung von Mustern bis zur FE-Modellerstellung gezeigt. Auch hier ist zu erkennen, dass der ein-eindeutige topologische- und geometrische Zustand automatisiert bestimmt werden kann.

Basis-Muster vor Überlagerung



Topologie-Ergebnis



simulationsfähiges
3D SFE CONCEPT Modell (LS-DYNA Export)

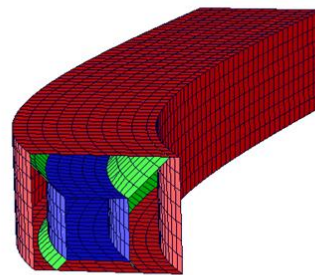


Abbildung II.1.3.7: Von der Musterüberlagerung bis zum 3D-FE-Modell

Das erlaubt eine äußerst flexible Parametrisierung für die angeschlossene Optimierung. Die Optimierung erfordert u.a. die Definition des Bau- und Designraums, die Definition der Zielgrößen, Nebenbedingungen, der zulässigen Designgrenzen und Designvariablen.

Abbildung II.1.3.8 zeigt die Möglichkeit mit den bei realen Strangpressprofilen sehr oft auftretenden Zellen-Mustern zu arbeiten.

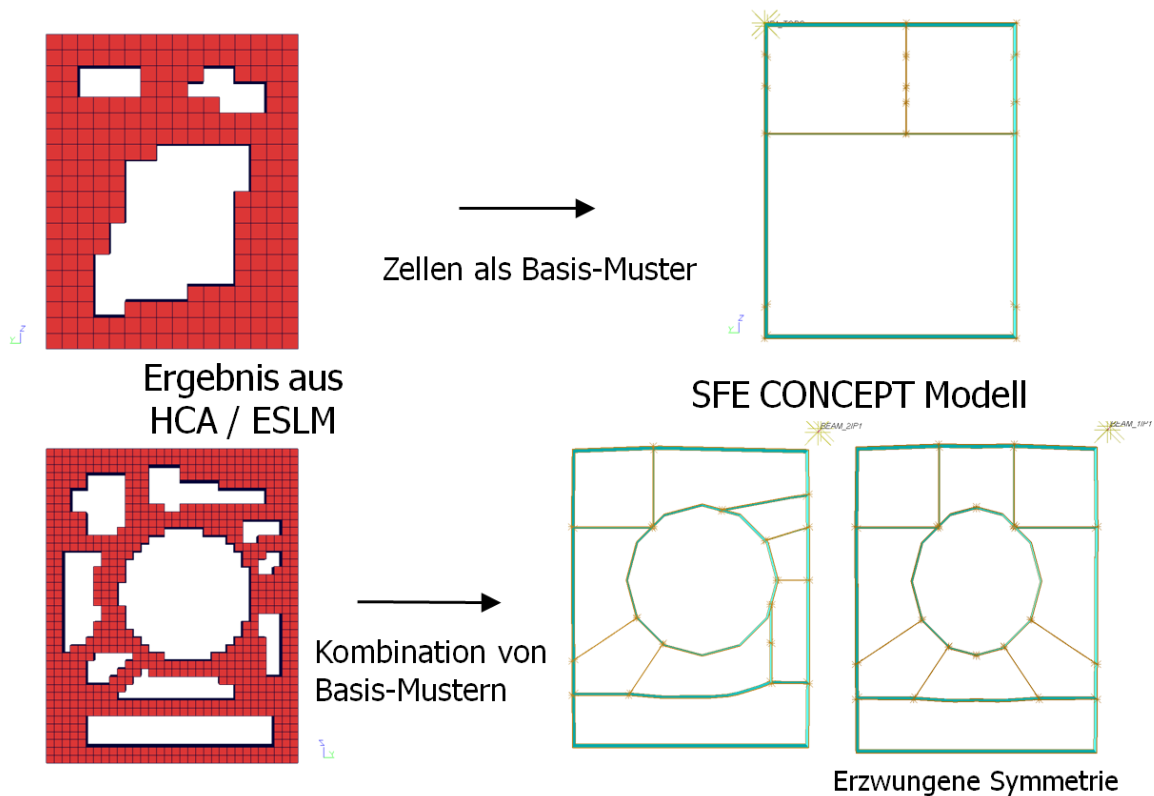


Abbildung II.1.3.8: Topologieerkennung in Verbindung mit Zellen-Mustern

Abbildung II.1.3.9 zeigt einige weitere, reale Beispiele für Strangpressprofile mit Zell-Charakter, die ebenso durch Musterüberlagerung abgebildet werden können.

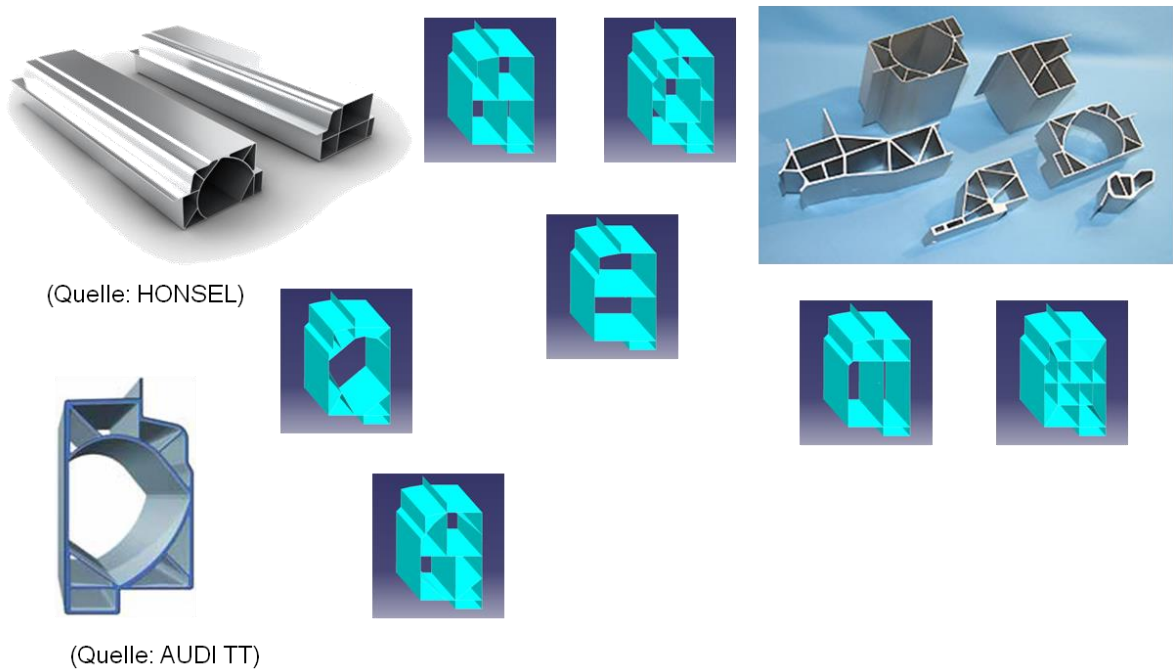


Abbildung II.1.3.9: Weitere Beispiele, die aus Musterüberlagerung entstehen können

Das Interface inklusive der programmtechnischen Umsetzung zwischen SFE CONCEPT und GRAMB ist unter Berücksichtigungen der Designänderungen in GRAMB umgesetzt. Aus SFE CONCEPT kann auch ein Graphenmodell erstellt werden.

Ergebnisse der Crash-Topologieoptimierung mit neuer HCA-Methode

Als Ergänzung zu den Aktivitäten, die in Berlin bei der SFE GmbH für das Crash-Topo-Projekt liefen, wurde im Rahmen der Kooperation mit Prof. Duddeck (bei Antragstellung tätig an der Queen Mary University of London und seit Mai 2010 Leiter des Fachgebiets Computational Mechanics an der Technischen Universität München) eine neue Variante zur HCA-Methode (Hybrid Cellular Automata) entwickelt und validiert. Die in der Software LS-TaSC implementierte ursprüngliche Methode, die vom Projektpartner DYNAMore untersucht wurde, beruht auf einer Füllung des Designraums mit Volumenelementen (Voxels), wie dies oft in der Topologieoptimierung eingesetzt wird. Dies ist sinnvoll, wenn die Strukturen Volumencharakter haben, jedoch ist es, wie einige Ergebnisse von DYNAMore im Laufe des Projekts gezeigt haben, mit einem sehr hohen numerischen Aufwand verbunden, wenn die Strukturen dünnwandig

sind. Klassische Strukturen im Automobilbau bestehen jedoch zum großen Teil aus solch dünnwandigen Bauteilen; dies gilt auch für die im Projekt untersuchten Strangpressprofile. Zusätzlich ist der Einsatz einer Zielgröße, die auf die Vergleichmäßigung der Deformationsenergie abzielt, nur bedingt zu rechtfertigen. Dünnwandige Strukturen absorbieren meist Energie über lokales Faltenbeulen, bei dem sehr lokalisierte Zonen mit hoher plastischer Energie sich abwechseln mit Bereichen geringerer. Insofern erscheint eine Zielgröße angemessen, die die Vergleichmäßigung nur über größere Strukturbereiche anstrebt.

Diese Ausgangssituation veranlasste die Entwicklung eines HCA-Verfahrens, das weiterhin nichtlineare Crashberechnungen benutzt aber über sogenannte Grundstrukturen dünnwandige Topologien vorgibt und aus diesen die optimale Struktur ableitet. Der Designraum wird daher mit dünnwandigen Hohlwürfeln zu Beginn der Optimierung ausgefüllt (Abbildung I.1.3.10). Jede der Wände dieser Würfel besteht aus einer relativ hohen Anzahl an Finiten-Elementen, so dass das Optimierungskriterium einer homogenisierten Verformungsenergie nur über größere Bereiche erfüllt sein muss und nicht mehr streng lokal gilt, wie in der klassischen HCA. Dies ermöglicht die Ausbildung von Beulmechanismen, wie sie im realen Crash entstehen. Kritisch ist hier immer noch, dass die Größe der Würfel die Beulmuster beeinflusst – hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Zusätzlich ist bislang die Methode nur für reguläre Würfelgefüllungen etabliert, eine entsprechende Erweiterung auf unregelmäßige Grundstrukturen ist als Forschungsprojekt geplant. Trotz der noch bestehenden Einschränkungen ist die entwickelte Methode bereits in der Lage, einige praxisrelevante Fälle der Crash-Topologieoptimierung zu lösen.

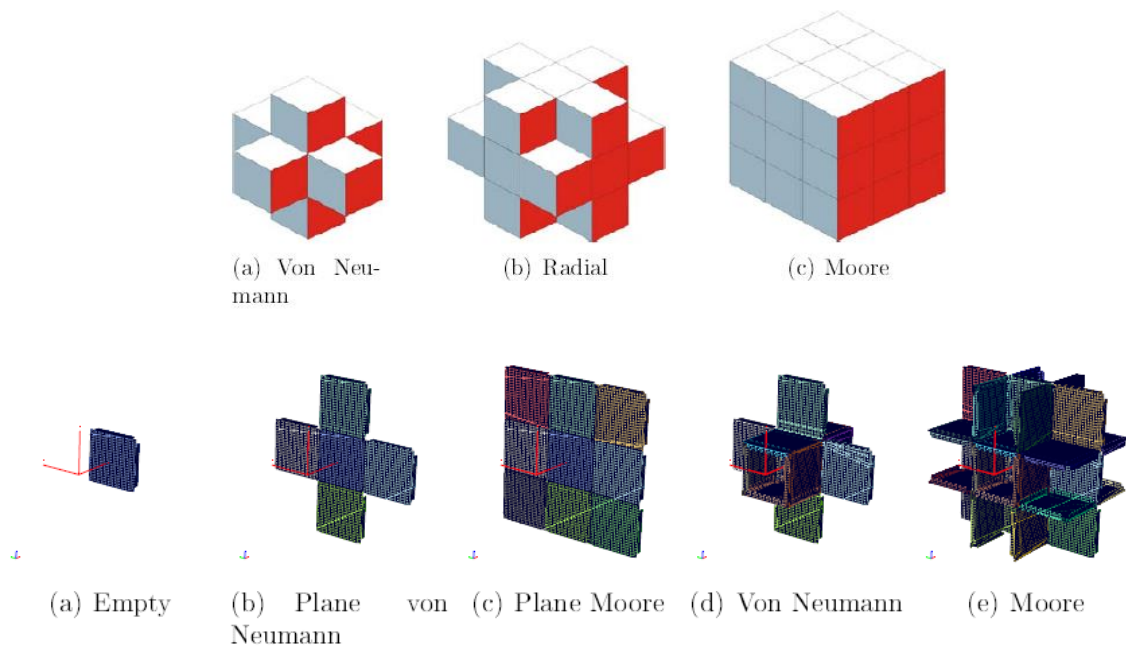


Abbildung II.1.3.10: Klassische HCA-Nachbarschaftsdefinition mit kleinen Volumenelementen (oben) und neuer Ansatz mit dünnwandigen Wänden mit einer höheren Anzahl an Finiten-Schalenelementen (unten).

Da im Ablauf der neuen HCA-Methode während der Optimierung ganze Teile der Grundstrukturen gelöscht und wieder eingeführt werden, um die optimale Topologie zu ermitteln, ist eine konsistente und automatisierte Behandlung der Geometrie und der Verbindungen erforderlich. Dies gelingt über die parametrische Geometriebeschreibung mittels der Software SFE CONCEPT. Ferner ist diese neue Methode in der Lage, optimale Geometrien abzuleiten, die dann ohne weitere Interaktion mit dem Benutzer einer weiteren Formoptimierung unterzogen werden können. Dies ist eine sehr wichtige Innovation für die Topologieoptimierung, da dies in der Vergangenheit meist nicht möglich war. Auch hier ist die parametrische Darstellung (SFE CONCEPT) Grundlage des Verfahrens. Es gelingt somit, nicht nur grobe Geometrieideen abzuleiten, sondern in der Kopplung von Form- und Topologieoptimierung eine Feinabstimmung der Struktur auf die Crashlastfälle zu erreichen.

Zur Validierung der Methode wurden zunächst Beispiele aus der linearen Elastostatik untersucht, da die Ergebnisse direkt bewertet werden können. Im Anschluss daran wurden verrippte Strukturen und Extrusionsstrukturen optimiert. Abbildung II.1.3.11 zeigt ein Ergebnis einer Struktur mit inneren Verstärkungen, die sukzessive gelöscht oder wieder hinzugenommen werden. Das Optimum ist rechts abgebildet und entspricht den in der Literatur zu findenden Ergebnissen.

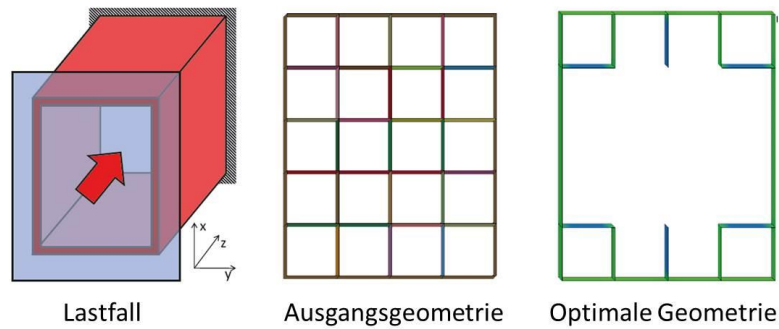


Abbildung II.1.3.11: Extrusionsstruktur unter axialer Crashbelastung (links) mit inneren Verstrebungen (in der Mitte die Ausgangssituation und rechts das Ergebnis der Optimierung).

Um die Methode besser einschätzen zu können, wurden Optimierungen durchgeführt, die in etwa denen der anderen Crash-Topo-Partner entsprechen, d.h. es wurde der im Projekt definierte Lastfall eines Pfahlaufpralls mit dem komplexen Schwellerquerschnitt herangezogen. Hierbei wurde zusätzlich die Grundstruktur um Diagonalelemente erweitert, um die Flexibilität der Methode zu erhöhen. Abbildung II.1.3.12 zeigt den Querschnitt mit den Ausgangsgeometrien (links nur zueinander rechtwinklige Versteifungen und mittig mit zusätzlichen Diagonalelementen). Jeweils rechts sind dann die jeweiligen Optimierungsergebnisse dargestellt. Man erkennt, dass die Optimierung ähnliche Tendenzen hat, jedoch werden leicht unterschiedliche Geometrien erzeugt. Dies ist bei Crashtoptimierungen aufgrund der Multimodalität/Nichtlinearität zu erwarten.

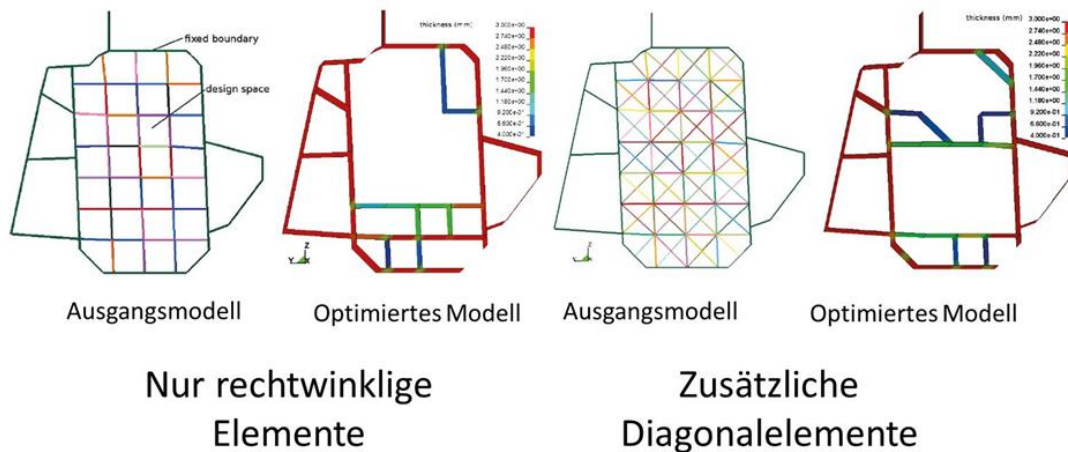


Abbildung II.1.3.12: Extrusionsstruktur unter axialer Crashbelastung (links) mit inneren Verstrebungen (in der Mitte die Ausgangssituation und rechts das Ergebnis der Optimierung).

Die Entwicklungen wurden von Stephan Hunkeler, Doktorand an der Queen Mary University of London durchgeführt und seitens SFE GmbH und der englischen Universität unterstützt. Hierfür sei hier ausdrücklich gedankt.

II.1.4 Wissenschaftlich - technische Ergebnisse - HAW Hamburg

Die hier vorgestellte Optimierungsmethode der *Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung (GHT)* (Schumacher und Ortmann 2012a/b/c, Ortmann und Schumacher 2012/2013), welche für die Optimierung von crashbelasteten Profilstrukturen geeignet ist, basiert auf Vorarbeiten im Bereich der *Bubble-Methode* (Eschenauer, Kobelev und Schumacher 1994, Schumacher 2005) und der graphenbasierten Optimierung von Fluggastsitzen (Olschinka und Schumacher 2008).

Als Startentwurf für diese Methode kann ein hohler Profilquerschnitt, aber auch ein voroptimierter Profilquerschnitt verwendet werden, der z.B. durch eine Optimierungsmethode erzeugt wurde, die weniger rechenintensiv als die hier vorgestellte Methodik ist. Besonders sinnvoll ist die Verwendung von voroptimierten Startentwürfen, die bereits linear statische Anforderungen an die Struktur wie Biege- und Torsionssteifigkeiten erfüllen und von Entwürfen, die mit den beiden "schnellen" Optimierungsmethoden *HCA* und *ESL* erzeugt wurden und die Crash-Lastfälle bereits (unter Einschränkungen) berücksichtigt haben (siehe Abschnitt II.1.2 und II.1.3).

II.1.4.1 Beschreibung von mechanischen Strukturen durch mathematische Graphen

Die folgenden Erläuterungen stammen aus (Ortmann und Schumacher 2012).

In diesem Abschnitt wird eine Graphen-Syntax vorgestellt, mit welcher mechanische Strukturen durch mathematische Graphen abstrahiert werden können. Der Profilquerschnitt der mechanischen Struktur muss dabei über die Bauteillänge topologisch konstant sein. Typische Beispiele hierfür aus der Automobilindustrie sind Strangpressprofile in Rohkarosserien, welche u. a. Verwendung als Schweller oder Längsträger finden können. Für die Beschreibung der Bauteilgeometrie werden ungerichtete, schlichte, zusammenhängende, planare Graphen verwendet.

Die in dieser Graphen-Syntax verwendeten Knotentypen lassen sich in zwei Kategorien einordnen. Strukturelle Knoten repräsentieren Subkomponenten der zu beschreibenden

Struktur. Logische Knoten besitzen hingegen kein direktes geometrisches Pendant und speichern abstrakte Informationen.

Die Kombination aus strukturellen und logischen Knoten ermöglicht die Beschreibung des Profilquerschnitts einer mechanischen Struktur. Abbildung II.1.4.1 zeigt eine Übersicht der Knotentypen. Auf der linken Seite ist ein mathematischer Graph dargestellt und auf der rechten Seite die mechanische Struktur, welche durch den Graphen abstrahiert wird.

Einzelne Wände des Profilquerschnitts werden durch eine Kombination von drei unterschiedlichen Knoten dargestellt, die untereinander mit Kanten verbunden sind. Der *BEAMG-Knoten* enthält Informationen über die Dicke der Wand und seine Krümmung. Der *BEAM1-* und der *BEAM2-Knoten* dienen der Definition der Orientierung der Subkomponente. Die Kombination dieser drei Knotentypen wird im Folgenden als *Graphen-Balkenelement* bezeichnet. Verbindungen zwischen Wänden des Profilquerschnitts und somit zwischen den *Graphen-Balkenelementen*, werden durch *LINK-Knoten* beschrieben, welche mit den äußeren Knoten der *Graphen-Balkenelemente* über Kanten verbunden sind. Die *LINK-Knoten* speichern Informationen über die Art der Verbindung der Wände des Profilquerschnitts. Es können gerade Verbindungen, Rundungsradien und Fasen definiert werden. Die Verbindungen zwischen den Wänden und damit auch die Wände selbst werden durch *COORD-Knoten* im Raum positioniert. Die *COORD-Knoten* sind durch Kanten mit den *LINK-Knoten* verbunden und enthalten kartesische Koordinaten als Informationen. Der letzte Knotentyp in dieser Graphen-Syntax ist der *PARAM-Knoten*, der allgemeine Informationen über das Bauteil speichert. Hierzu zählen neben einer Bezeichnung für die Struktur auch die Bauteillänge und die Dichte des verwendeten Materials der Struktur.

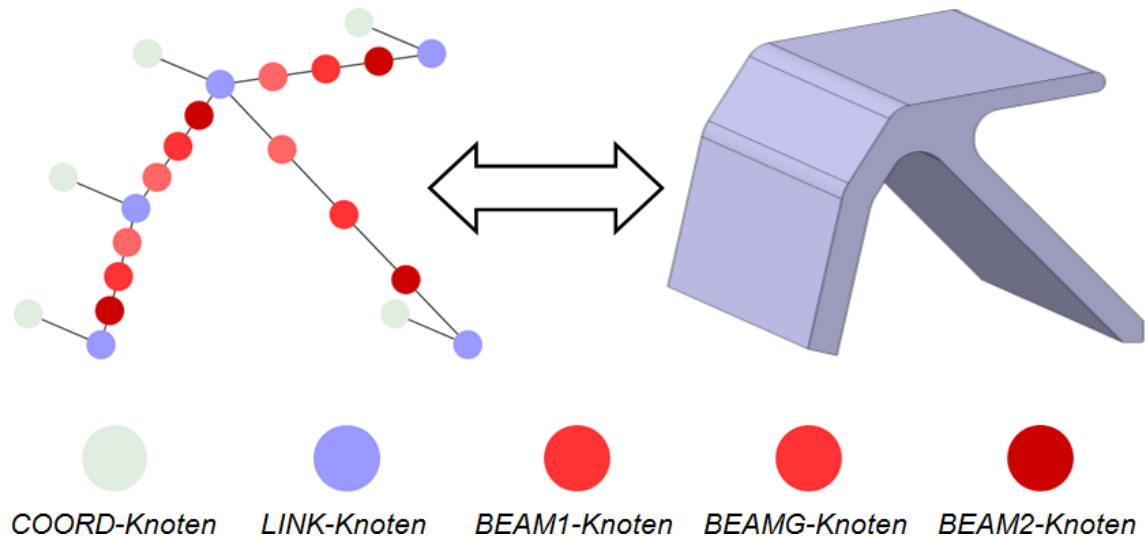


Abbildung II.1.4.1: Übersicht der Knotentypen der Graphen-Syntax

Durch die Beschreibung des Profilquerschnitts der Struktur durch einen mathematischen Graphen können eine Vielzahl von geometrischen und mathematischen Problemen mit effizienten, der Graphentheorie entlehnten Algorithmen gelöst werden. Hierzu zählt die Überprüfung von Fertigungsrestriktionen. Die in diese Methode implementierten Fertigungsrestriktionen basieren derzeit auf Herstellungsprozessen von Aluminium-Strangpressprofilen. Berücksichtigung finden neben minimalen und maximalen Wanddicken auch Mindestabstände und minimale Verbindungswinkel zwischen Wänden und eine Maximalanzahl von miteinander verbundenen Wänden an Verbindungsstellen.

Aus einem mathematischen Graphen, welcher nach der beschriebenen Syntax aufgebaut ist, kann automatisiert ein Geometriemodell und ein rechenfähiges *FE-Modell* erzeugt werden. Hierfür wird das an der HAW Hamburg entwickelte Programmsystem *GRAMB (Graph based Mechanics Builder)* verwendet. Dieses transformiert den mathematischen Graphen in Programmbefehle für ein *CAE-System*. Während der Laufzeit von *GRAMB* wird ein *CAE-System* angesteuert, um ein Geometrie- und/oder ein *FE-Modell* von der Struktur zu erzeugen. Im Rahmen des Projekts wurde *SFE CONCEPT*[®] als *CAE-System* verwendet.

II.1.4.2 Ablauf der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung

Die nachstehenden Ausführungen stammen aus (Ortmann und Schumacher 2012).

Das Prinzip der hier vorgestellten Optimierungsmethode ist die Trennung des Optimierungsproblems in zwei ineinander geschachtelte Schleifen. In der äußeren Optimierungsschleife wird die Topologie und Gestalt der zu optimierenden Struktur mithilfe von aus Expertenwissen abgeleiteten Heuristiken modifiziert. Diese benutzen Simulationsdaten und Informationen über die mechanischen Eigenschaften der Struktur, um Änderungen an der Struktur durchführen zu können. Die Heuristiken können teilweise miteinander kombiniert werden, aber größtenteils konkurrieren sie untereinander, da in jedem Durchlauf der äußeren Optimierungsschleife lediglich eine Modifikation der Topologie der Struktur erlaubt ist. Die Steuerung der untereinander konkurrierenden Heuristiken erfolgt durch ein auf Prioritätswerten basierendes System. Die Prioritätswerte quantifizieren die Dringlichkeit der Topologieänderung, welche die jeweilige Heuristik durchführen würde. Nach jedem Durchlauf der äußeren Optimierungsschleife erfolgt ein Durchlauf in der inneren Optimierungsschleife. Hier wird das Optimierungsproblem mit der von der äußeren Optimierungsschleife oder dem Startentwurf vorgegebenen Topologiekategorie auf ein herkömmliches Gestaltoptimierungs- und Dimensionierungsproblem reduziert. Für die Struktur werden Entwurfsvariablen und ihre Grenzen generiert. Diese steuern die Gestalt des Profilquerschnitts der Struktur und die Wanddicken einzelner Wände.

Der prinzipielle Ablauf einer solchen Optimierungsprozedur ist in Abbildung II.1.4.2 illustriert.

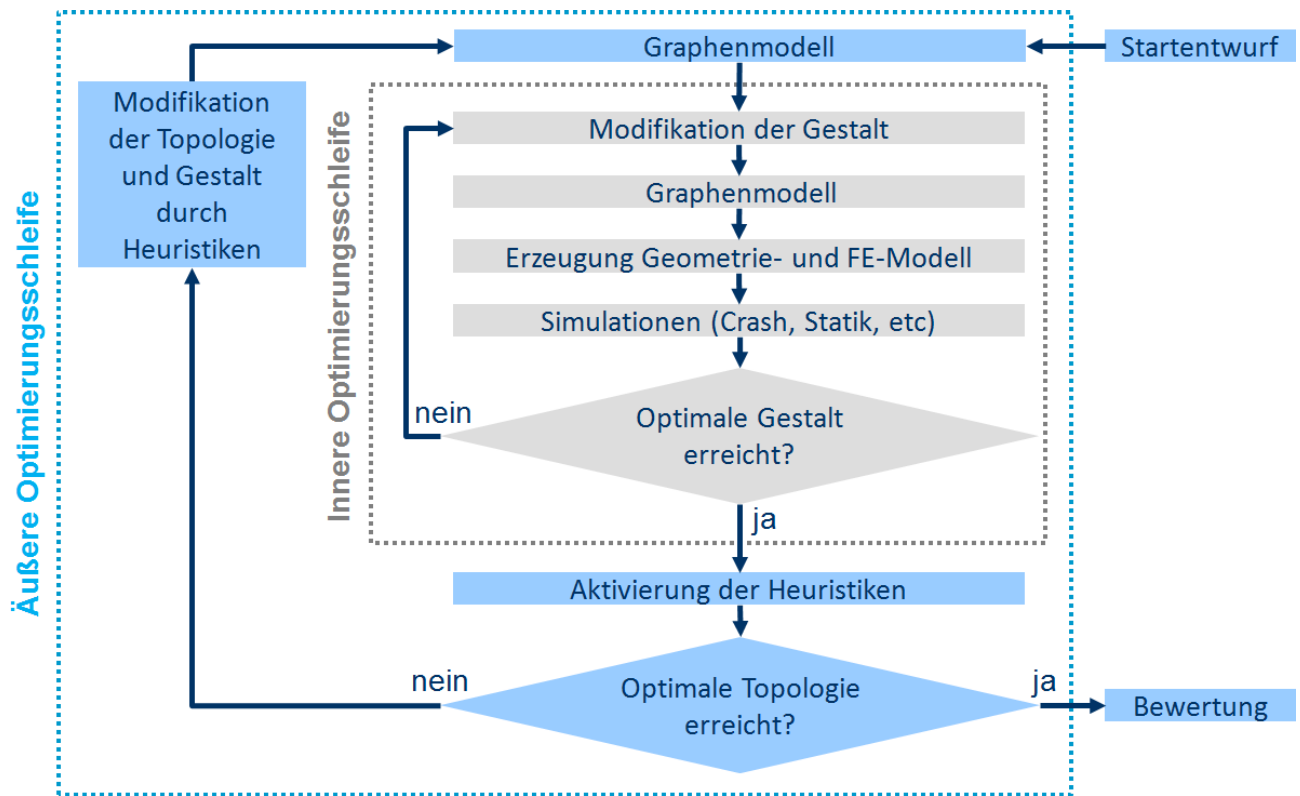


Abbildung II.1.4.2: Ablauf einer graphen- und heuristikbasierten Topologieoptimierung

Die *graphenbasierte* Generierung von Entwurfsvariablen und ihren Grenzen für die Gestaltoptimierung und Dimensionierung in der inneren Optimierungsschleife wird mit Algorithmen durchgeführt, die das Wachstum von rechteckigen Kristallen simulieren (Abbildung II.1.4.3). Dies führt zu einer konservativen Abschätzung der Grenzen der Entwurfsvariablen, was die Anzahl an ungültigen Entwürfen in der inneren Optimierungsschleife deutlich reduziert.

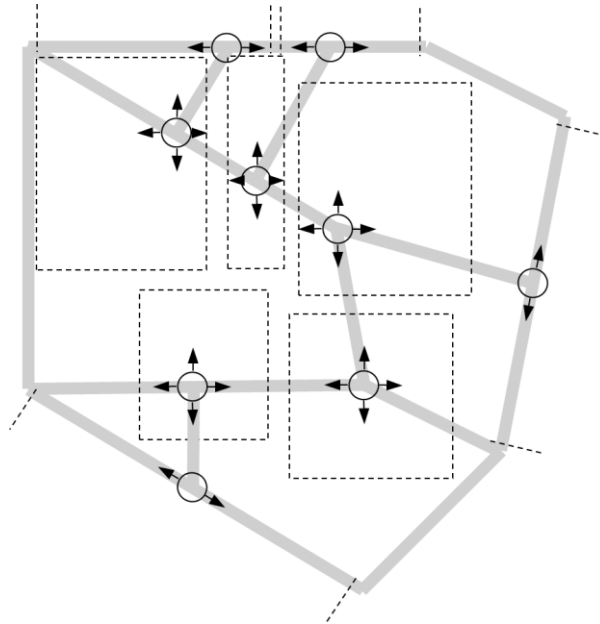


Abbildung II.1.4.3: Generierung von Entwurfsvariablen und ihren Grenzen für die innere Optimierungsschleife

Für die praktische Durchführung der Optimierungsprozedur ist an der HAW Hamburg das Programm *TOC (Topology Optimizer for Crash-loaded structures)* entwickelt worden. *TOC* besitzt Schnittstellen zu *GRAMB*, *LS-DYNA*[®] und *LS-OPT*[®]. Letzteres wird für die Durchführung der inneren Optimierungsschleife verwendet, während die mit *LS-DYNA*[®] erzeugten Simulationsdaten eingelesen, analysiert und den Heuristiken zur Verfügung gestellt werden.

Detaillierte Ausführungen zum Ablauf der Methode finden sich in (Ortmann und Schumacher 2013).

II.1.4.3 Implementierte Heuristiken

Die Heuristiken benötigen Informationen über die mechanischen Eigenschaften der Struktur in den zu untersuchenden Lastfällen. Hierzu werden den Heuristiken von der Optimierungsprozedur die Daten der *FE-Simulationen* des Optimums der letzten Iteration zur Verfügung gestellt. Die Simulationsdaten werden dabei getrennt nach den Lastfällen direkt den *Graphen-Balkenelementen* des Graphen zugeordnet.

Die *FE-Knoten* der Struktur und damit auch ihre Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen lassen sich einzelnen Wänden des Profilquerschnitts der Struktur und damit den entsprechenden *Graphen-Balkenelementen* zuordnen. Die innere Energie und die Spannungen der *Finiten-Elemente* können auf die gleiche Art und Weise ebenfalls den *Graphen-Balkenelementen* zugeordnet werden.

Die Heuristiken wurden aus Expertenwissen abgeleitet. Hierfür fanden im Rahmen des Forschungsprojekts *CRASH-TOPO* mehrere Arbeitskreissitzungen mit Crash-Experten von Automobilherstellern statt. Aus diesem Grund werden die Heuristiken nur für Crash-Probleme sinnvolle Änderungen der Topologie und Gestalt der zu optimierenden Struktur durchführen, nicht jedoch für allgemeine strukturmechanische Fragestellungen. In diesem Abschnitt werden zunächst die konkurrierenden Heuristiken *Entfernen unbelasteter Wände*, *Abstützen sich schnell deformierender Wände*, *Entfernen kleiner Kammern*, *Ausgleichen der Energiedichte* und *Ausnutzen des Deformationsraums* vorgestellt. Anschließend folgen die beiden nicht-konkurrierenden Heuristiken *Glätten der Struktur* und *Skalieren der Wanddicken*, die theoretisch nach jeder Topologieänderung durch eine der anderen Heuristiken ausgeführt werden können. Die Erläuterungen zu den Heuristiken *Abstützen sich schnell deformierender Wände*, *Entfernen unbelasteter Wände* und *Ausgleichen der Energiedichte* sind aus (Ortmann und Schumacher 2012) übernommen.

Tiefere Beschreibungen der den Heuristiken zugrunde liegenden Mathematik finden sich in (Ortmann und Schumacher 2013).

Heuristik Entfernen unbelasteter Wände - Delete unnecessary walls (DUW)

Diese Heuristik hat das Ziel, nicht benötigte Wände aus einer Struktur zu entfernen. Ein geeignetes Maß für die strukturmechanische Relevanz einer Wand stellt ihre innere Energiedichte dar. Ist diese in Relation zu der durchschnittlichen inneren Energiedichte der Gesamtstruktur vernachlässigbar gering, lässt dies darauf schließen, dass die betreffende Wand entfernt werden kann, ohne die mechanischen Eigenschaften der Gesamtstruktur signifikant zu beeinflussen. Eine solche Aussage lässt sich jedoch niemals absolut, sondern immer nur für spezifische Lastfälle treffen.

Anwendung findet diese Heuristik vor allem bei Strukturen, bei denen die innere Energiedichte unter Last inhomogen verteilt ist. Dies tritt z.B. auf, wenn innere Wände einer Struktur mechanisch ungünstig positioniert sind oder wenn die Struktur nur partiell belastet wird. In Abbildung II.1.4.4 ist eine Profilstruktur dargestellt, die durch eine Kugel intrudiert wird. Die gestrichelte Wand des Profils ist nur einer geringen Belastung ausgesetzt und nimmt daher in Relation zum Rest der Struktur nur geringe Mengen an Energie auf. Die Heuristik würde diese Wand aus der Struktur entfernen.

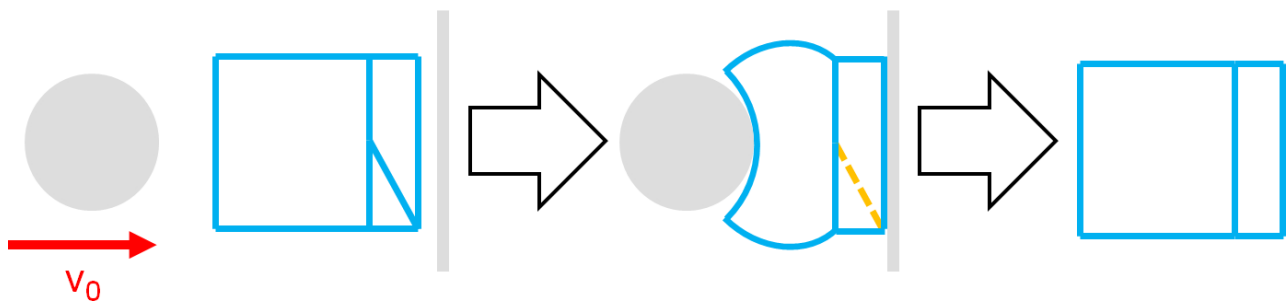


Abbildung II.1.4.4: Ziel und Anwendungsbereich der Heuristik Entfernen unbelasteter Wände

Heuristik Abstützen sich schnell deformierender Wände –

Support fast deforming walls (SFDW)

Ein Grundprinzip der Auslegung von Fahrzeugstrukturen nach den Anforderungen der passiven Sicherheit ist die Umwandlung von kinetischer Energie in Deformationsenergie durch kontrollierte Deformation von einzelnen Fahrzeugkomponenten. Ein prominentes Beispiel hierfür ist der Längsträger, der durch ein gleichmäßiges Faltenbeulen große Mengen an Energie aufnehmen kann.

Die Geschwindigkeit, mit welcher sich eine Wand in Relation zu der Gesamtstruktur deformiert, gibt Ausschuss darüber, ob sich diese Wand kontrolliert deformiert oder ob sie durch zu schnelle Deformation die strukturelle Integrität der Gesamtstruktur schwächt. Die Heuristik *Abstützen sich schnell deformierender Wände* hat das Ziel Wände in einer Struktur zu identifizieren und zu verstärken, die sich schneller und unkontrollierter als der Rest der Struktur deformieren. Hierzu zählen Wände, die durch eine Belastung instabil werden, also Beul-, Falt oder Knickphänomene durchführen und Wände, die einer Intrusion durch andere Körper weniger Widerstand als der Rest der Struktur entgegensetzen.

Anhand einer Profilstruktur, welche zwischen zwei Barrieren zusammengedrückt wird, ist das Prinzip dieser Heuristik in Abbildung II.1.4.5 verdeutlicht. Die gestrichelte Wand in der Mitte der Profilstruktur hat aufgrund ihrer Länge und Lage eine größere Neigung zum Beulen als die anderen Wände der Struktur und wird daher senkrecht und auf dem kürzesten Weg mit einer neuen Wand abgestützt.

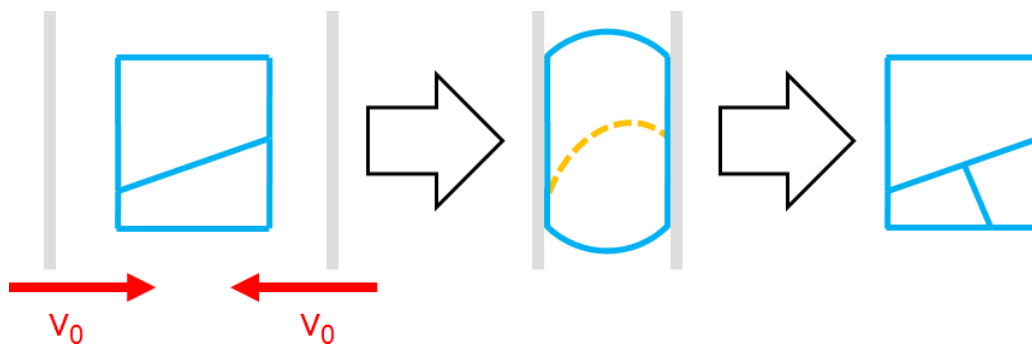


Abbildung II.1.4.5: Ziel und Anwendungsbereich der Heuristik **Abstützen sich schnell deformierender Wände**

Heuristik Entfernen kleiner Kammern - Remove small chambers (RSC)

Die Vereinfachung einer bereits bestehenden Struktur ist das Ziel dieser Heuristik. Hierfür werden durch mehrere Wände gebildete kleine Kammern aus der Struktur entfernt und durch einzelne Wände ersetzt. Dies geschieht unter der Annahme, dass durch das Entfernen einer solchen Substruktur die mechanischen Eigenschaften der Gesamtstruktur nicht signifikant beeinflusst werden. Die Heuristik behandelt nur Kammern, die aus drei Wänden bestehen, weil die Reduktion von einer n-seitigen zu einer dreiseitigen Kammer während der Gestaltoptimierung erfolgen kann, eine weitere Reduktion jedoch im Rahmen einer Gestaltoptimierung nicht möglich ist, da hierdurch die Topologie der Struktur modifiziert werden würde. Eine solche dreiseitige Kammer ist in der Profilstruktur in Abbildung II.1.4.6 gestrichelt dargestellt. Die Heuristik würde diese Kammer durch eine einzelne Wand ersetzen.

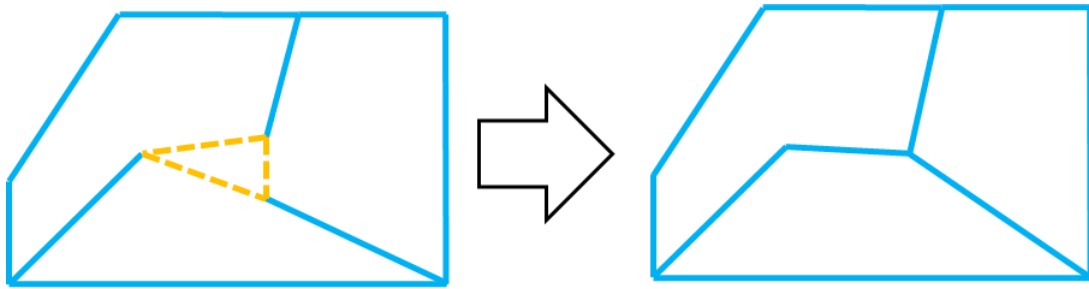


Abbildung II.1.4.6: Ziel und Anwendungsbereich der Heuristik Entfernen kleiner Kammern

Heuristik Ausgleichen der Energiedichte - Balance energy density (BED)

Effiziente mechanische Strukturen zeichnen sich häufig dadurch aus, dass sie unter Last eine relativ homogen verteilte innere Energiedichte besitzen. Solche Strukturen sind in der jeweiligen Belastung gleichmäßig beansprucht, was sich positiv auf ihre mechanischen Eigenschaften auswirkt. In der Strukturoptimierung existiert eine Reihe von Optimierungsansätzen, welche eine homogene Verteilung der inneren Energiedichte als Optimalitätskriterium einsetzen. Ein Beispiel hierfür ist die *HCA-Methode*.

Die in diesem Abschnitt vorgestellte Heuristik versucht Bereiche einer Struktur mit einer hohen inneren Energiedichte mit Bereichen, welche eine geringe innere Energiedichte aufweisen, zu verbinden. Dadurch soll die Verteilung der inneren Energiedichte in der Gesamtstruktur homogenisiert werden. In Abbildung II.1.4.7 ist ein Beispiel für den Anwendungsbereich dieser Heuristik illustriert. Die dort gezeigte, durch eine Kugel intrudierte Profilstruktur weist im Auftreffbereich der Kugel eine hohe innere Energiedichte auf, während der gegenüberliegende Bereich der Profilstruktur gegen eine Wand gedrückt wird und kaum Energie absorbiert. Die Heuristik würde diese beiden, in der Abbildung gestrichelt dargestellten Bereiche miteinander durch eine neue Wand verbinden.

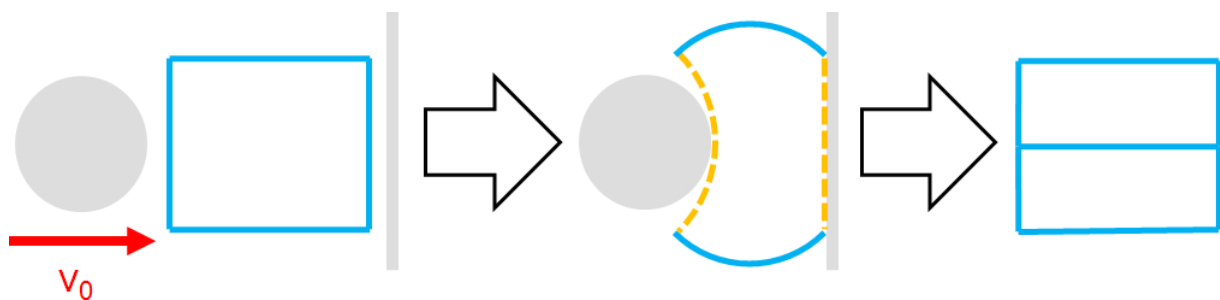


Abbildung II.1.4.7: Ziel und Anwendungsbereich der Heuristik Ausgleichen der Energiedichte

Heuristik Ausnutzen des Deformationsraums - Use deformation space (UDS)

Mechanisch gute Crash-Strukturen sind häufig dadurch gekennzeichnet, dass der zur Verfügung stehende Deformationsraum ausgenutzt wird. Wenn eine Struktur deformiert wird und sich einzelne Bereiche dieser Struktur aufeinander zu oder voneinander weg bewegen, dann sollte zwischen diesen Bereichen also eine Substruktur, ein Deformationselement oder ähnliches sein, welches der Relativbewegung der beiden Bereiche einen Widerstand entgegensetzt und durch gezielte Verformung Energie absorbiert.

Die Heuristik *Ausnutzen des Deformationsraums* verbindet charakteristische Stellen des Profilquerschnitts wie z.B. Ecken, die eine hohe relative Verschiebung zueinander aufweisen, miteinander durch eine neue Wand. Als charakteristische Stellen werden Ecken des Profilquerschnitts sowie Verbindungsstellen von mehreren Wänden angesehen. Die relative Verschiebung wird für die Struktur in einer vorgegebenen Analyseebene als Schnitt durch die deformierte Struktur bestimmt und in Relation zu dem Anfangsabstand der betrachteten charakteristischen Stellen bewertet.

Abbildung II.1.4.8 verdeutlicht das Prinzip dieser Heuristik. In der Abbildung wird eine Profilstruktur, die auf einer Seite durch eine starre Wand gestützt wird, auf der anderen Seite durch eine kleine Kugel intrudiert. Die eingekreisten charakteristischen Stellen des Profilquerschnitts erfahren eine hohe relative Verschiebung zueinander und werden daher miteinander durch eine neue Wand verbunden.

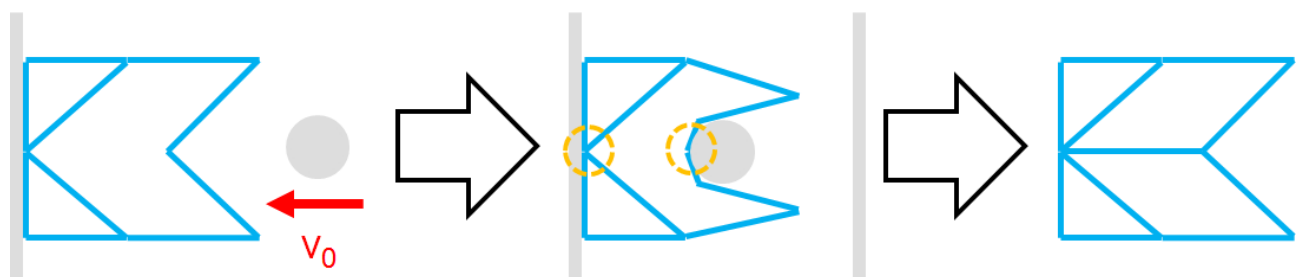


Abbildung II.1.4.8: Ziel und Anwendungsbereich der Heuristik Ausnutzen des Deformationsraums

Heuristik Glätten der Struktur - Smooth structure (SS)

Diese Heuristik verfolgt das Ziel, den Profilquerschnitt der Struktur zu glätten und zu vereinfachen. Hierfür werden miteinander verbundene Wände zu einer Wand zusammengefasst, wenn diese beiden Wände an ihrer Verbindungsstelle in einem stumpfen Winkel ausschließlich miteinander und nicht noch mit anderen Wänden verbunden sind. Hierdurch wird die Struktur vereinfacht und die Anzahl der Entwurfsvariablen der Gestaltoptimierung der inneren Optimierungsschleife reduziert. In Abbildung II.1.4.9 ist eine Profilstruktur illustriert, bei welcher die Heuristik die gestrichelt dargestellten Wände durch eine einzelne Wand ersetzen würde.

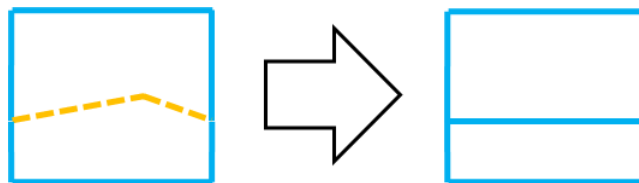


Abbildung II.1.4.9: Ziel und Anwendungsbereich der Heuristik Glätten der Struktur

Die Heuristik führt selbst keine Topologieänderung der Struktur durch, benötigt daher keinen Prioritätswert und wird nach jeder Topologieänderung durch eine der anderen Heuristiken aktiviert. Besonderer Bedeutung kommt dieser Heuristik im Hinblick auf die Gesamtprozedur zu. Sie wird benötigt, wenn andere Heuristiken Wände aus der Struktur entfernen und dann diese Knicke aus zwei stumpf aufeinandertreffenden Wänden zurücklassen, welche bei vielen Beanspruchungsarten mechanisch ungünstig sein können.

Heuristik Skalieren der Wanddicken - Scale wall thicknesses (SWT)

Topologische Änderungen der Struktur können ihr mechanisches Verhalten gravierend beeinflussen. Durch das Einbringen von neuen Wänden oder das Entfernen von bereits bestehenden Wänden verändern sich unter anderem die Masse und die Steifigkeit der Struktur. Sprunghafte Änderungen des mechanischen Verhaltens einer Struktur können negative Auswirkungen auf den Ablauf einer Optimierungsprozedur haben.

Aus diesem Grund skaliert diese Heuristik die Wanddicken der Struktur derart, dass die Masse der Struktur nach den topologischen Änderungen identisch ist mit der Masse der Struktur vor diesen Modifikationen. Zwar können Sprünge im mechanischen Verhalten dadurch nicht verhindert, aber abgemildert werden. Die Skalierung der Wanddicken ist schematisch in Abbildung II.1.4.10 dargestellt. Durch die Integration der neuen Wand in die Mitte des Profilquerschnitts der Struktur erhöht sich die Masse der Struktur sprunghaft. Die Heuristik würde die Wanddicken der Wände der Struktur derart skalieren, dass die Masse der topologisch modifizierten Struktur identisch ist mit der Masse der Struktur vor der Topologieänderung.

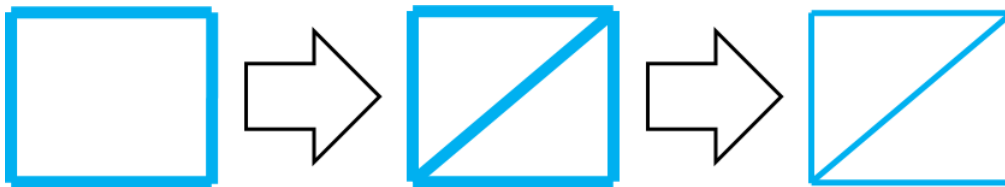


Abbildung II.1.4.10: Ziel und Anwendungsbereich der Heuristik Skalieren der Wanddicken

Diese Heuristik gehört zu den nicht konkurrierenden Heuristiken und wird am Ende jedes Durchlaufs der äußeren Optimierungsschleife aktiviert.

II.1.4.4 Anwendungsbeispiele

Die Ausführungen zu den Anwendungsbeispielen stammen teilweise aus (Ortmann und Schumacher 2012).

Die hier vorgestellten Anwendungsbeispiele 1 und 2 verwenden die Materialdaten einer mit Magnesium und Silizium legierten Aluminiumknetlegierung, welche lösungsgeglüht und warmausgelagert wird. Dieses Material wird in der Automobilindustrie häufig für Aluminiumstrangpressprofile verwendet. Die exakte Werkstoffbezeichnung ist EN AW-6005 T6. In den Crash-Simulationen wird der plastische Bereich mit einem abschnittsweise linearen Zusammenhang zwischen Dehnung und Spannung abgebildet. In den inneren Optimierungsschleifen der Anwendungsbeispiele werden genetische Algorithmen eingesetzt.

Bei dem zweiten Anwendungsbeispiel handelt es sich um das Prozesskettenmodell, welches von allen Projektpartnern zur Validierung der Prozesskette verwendet wurde. Das Anwendungsbeispiel 3 ist die Optimierung des industriellen Modells des assoziierten Partners *Volkswagen-Osnabrück GmbH* und dient als Demonstrator.

Weitere Anwendungsbeispiele finden sich in (Ortmann und Schumacher 2013).

Für die praktische Durchführung der Anwendungsbeispiele ist neben den Programmsystemen *TOC* und *GRAMB* primär die von den Projektpartnern zur Verfügung gestellte Software genutzt worden. Dies umfasst *SFE CONCEPT*[®] (Erzeugung der *FE-Modelle*), *LS-DYNA*[®] (Durchführung der Simulationen) und *LS-OPT*[®] (Durchführung der Gestaltoptimierungen und Dimensionierungen der inneren Optimierungsschleifen)

Die Heuristik *Ausnutzen des Deformationsraums* ist erst nach der Fertigstellung der ersten beiden Anwendungsbeispiele in das Programm *TOC* implementiert worden und findet daher bei diesen keine Anwendung.

Anwendungsbeispiel 1

Die zu optimierende Struktur ist ein 150 mm breiter, 100 mm hoher und 5 mm tiefer Aluminiumrahmen. Alle Abmessungen beziehen sich hierbei auf die Mittelfläche des Rahmens. Die Struktur wird in einem einfachen, akademischen Lastfall mit einem Würfel mit einer Kantenlänge von 20 mm und einer Geschwindigkeit von 36 km/h beschossen. Eine Seite des Aluminiumrahmens ist hierbei eingespannt. Den Aufbau dieses Lastfalls zeigt Abbildung II.1.4.11. Der Startentwurf weist eine Wanddicke von 4 mm auf.

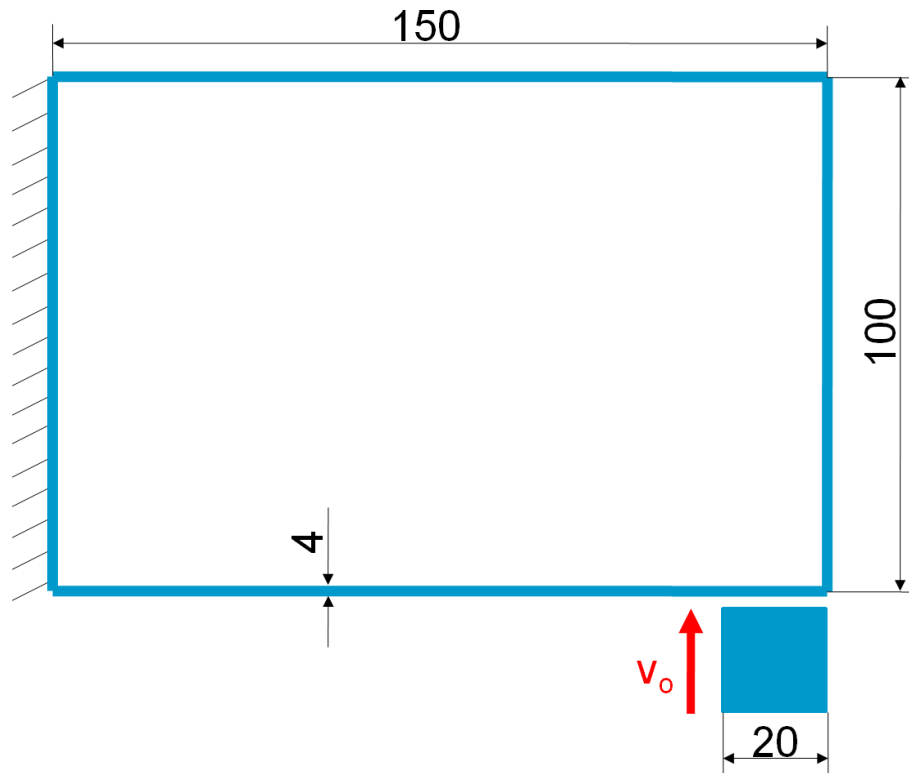


Abbildung II.1.4.11: Aufbau des Lastfalls in Anwendungsbeispiel 1

Für die durchzuführenden Crash-Simulationen wird der Rahmen mit *QUAD4-Schalenelementen*, welche eine Elementkantenlänge von 5 mm aufweisen, vernetzt. Der Würfel wird mit *HEXA8-Volumenelementen* diskretisiert (Abbildung II.1.4.12).

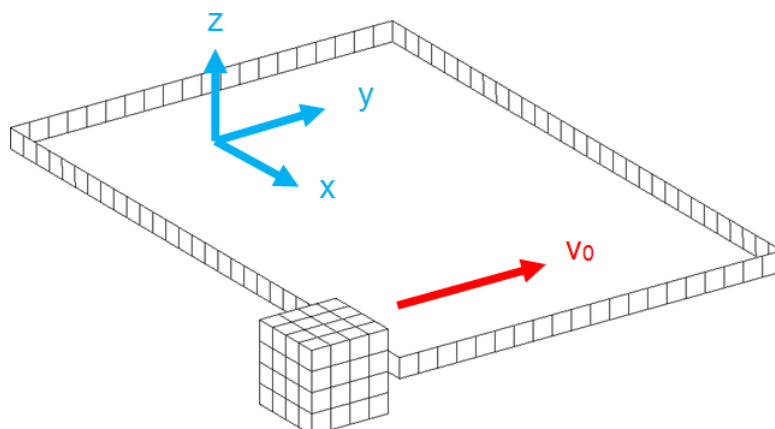


Abbildung II.1.4.12: Vernetzung der Struktur in Anwendungsbeispiel 1

Als Fertigungsrestriktionen werden ein minimaler Verbindungswinkel von 15° und ein Mindestabstand von 10 mm zwischen den Wänden verwendet. Die Wanddicke des Aluminiumrahmens kann Werte zwischen 1 und 5 mm annehmen. Die verwendeten Fertigungsrestriktionen in diesem Anwendungsbeispiel dienen aufgrund des akademischen Charakters des Lastfalls weniger dazu eine konkrete Herstellbarkeit der Struktur zu sichern, als vielmehr die Qualität der Crash-Simulationen in der Optimierung zu verbessern. Durch den Mindestabstand wird sichergestellt, dass eine einzelne Wand mindestens mit zwei Schalenelementen diskretisiert wird und durch den minimalen Verbindungswinkel werden Anfangsdurchdringungen zwischen einzelnen Wänden reduziert.

Der Widerstand des Aluminiumrahmens gegen die Intrusion durch den Würfel soll verbessert werden. Als Zielfunktion wird diese Intrusion benutzt, welche definiert ist als das Maximum der Verschiebungen der Ecken des Würfels in y -Richtung. Aufgrund der Geometrie wird die maximale Verschiebung des Würfels in eine beliebige Richtung immer einer seiner Ecken zuzuordnen zu sein. Die y -Geschwindigkeit des Würfelzentrums muss am Ende jeder Simulation, also nach der Entlastung des Aluminiumrahmens, kleiner gleich 0 sein, um das Entstehen von Entwürfen zu verhindern, bei denen der Würfel am Rahmen abgleitet und sich in y -Richtung weiterbewegt. Die Spezifikationen dieser Optimierungsprozedur sind in Tabelle II.1.4.a zusammengefasst.

Als weitere Restriktion dient die Masse des Rahmens, diese darf die 27 g des Startentwurfs nicht überschreiten. Die Spezifikationsliste dieses Anwendungsbeispiels zeigt Tabelle II.1.4.a.

Da es sich bei diesem Optimierungsproblem um eine Steifigkeitsmaximierung handelt, kann angenommen werden, dass die Massenrestriktion bei dem optimalen Entwurf aktiv sein wird. Um den Entwurfsraum sinnvoll einzugrenzen und alle Entwürfe mit einer geringeren Masse von vornherein auszuschließen, werden die Wanddicken jedes Entwurfs unter Berücksichtigung der Fertigungsrestriktionen derart skaliert, dass die Masse möglichst konstant bleibt.

Optimierungsziel:	Minimierung der Intrusion des Rahmens durch den Würfel
Entwurfsvariablen:	Topologie, Gestalt und Wanddicke des Rahmens
Funktionale Restriktionen:	Masse des Rahmens ≤ 27 g
	y-Geschwindigkeit des Würfels am Ende der Simulation ≤ 0
Fertigungsrestriktionen:	1 mm \leq Wanddicke der Struktur ≤ 5 mm
	Verzweigungswinkel zwischen zwei Wänden $\geq 15^\circ$
	Abstand zwischen zwei Wänden ≥ 10 mm

Tabelle II.1.4.a: Anwendungsbeispiel 1 - Spezifikationsliste

Die Änderungen des Profilquerschnitts des Aluminiumrahmens im Laufe der Optimierung sind in Abbildung II.1.5.13 bis Abbildung II.1.4.15 dokumentiert. Links in den Abbildungen sind die Startentwürfe, in der Mitte die Entwürfe nach den Topologieänderungen durch die Heuristiken und rechts die Ergebnisse der jeweiligen Iteration zu sehen. Die Historie der Zielfunktion und der Restriktionen sowie die Bezeichnungen der aktivierten Heuristiken fasst Tabelle II.1.4.b zusammen.

Der optimale Entwurf wird in der elften Iteration gefunden, weil in den Iterationen 12 bis 15 die Struktur durch keine der Heuristiken mehr verbessert werden kann. Die Entwürfe der Iterationen 3, 5, 8 und 9 werden ebenfalls nicht akzeptiert, da durch sie die Zielfunktion nicht verringert werden kann.

In der ersten Iteration wird eine neue Wand in Lastrichtung in den Profilquerschnitt des Aluminiumrahmens integriert und in der inneren Optimierungsschleife diagonal gestellt. Dieser diagonale Lastpfad bleibt auch in den nächsten Iterationen bestehen und wird in der zweiten und vierten Iteration abgestützt und mit der Unterseite (unten bezeichnet die negative y-Richtung) des Rahmens verbunden. In den Iterationen 6 und 7 wird dieser Lastpfad durch weitere Wände mit der Einspannung und der Oberseite des Rahmens verbunden. In der zehnten und elften Iteration bildet sich ein Kreuz aus verstärkenden Wänden im inneren des Profilquerschnitts, welches über zwei zusätzliche Wände mit der Einspannung des Rahmens verbunden ist.

Die Steifigkeit der Struktur kann durch die Optimierungsprozedur deutlich verbessert werden. In Relation zu dem Startentwurf kann die Intrusion in der elften Iteration um 89,31 % von 42,75 auf 4,569 mm reduziert werden.

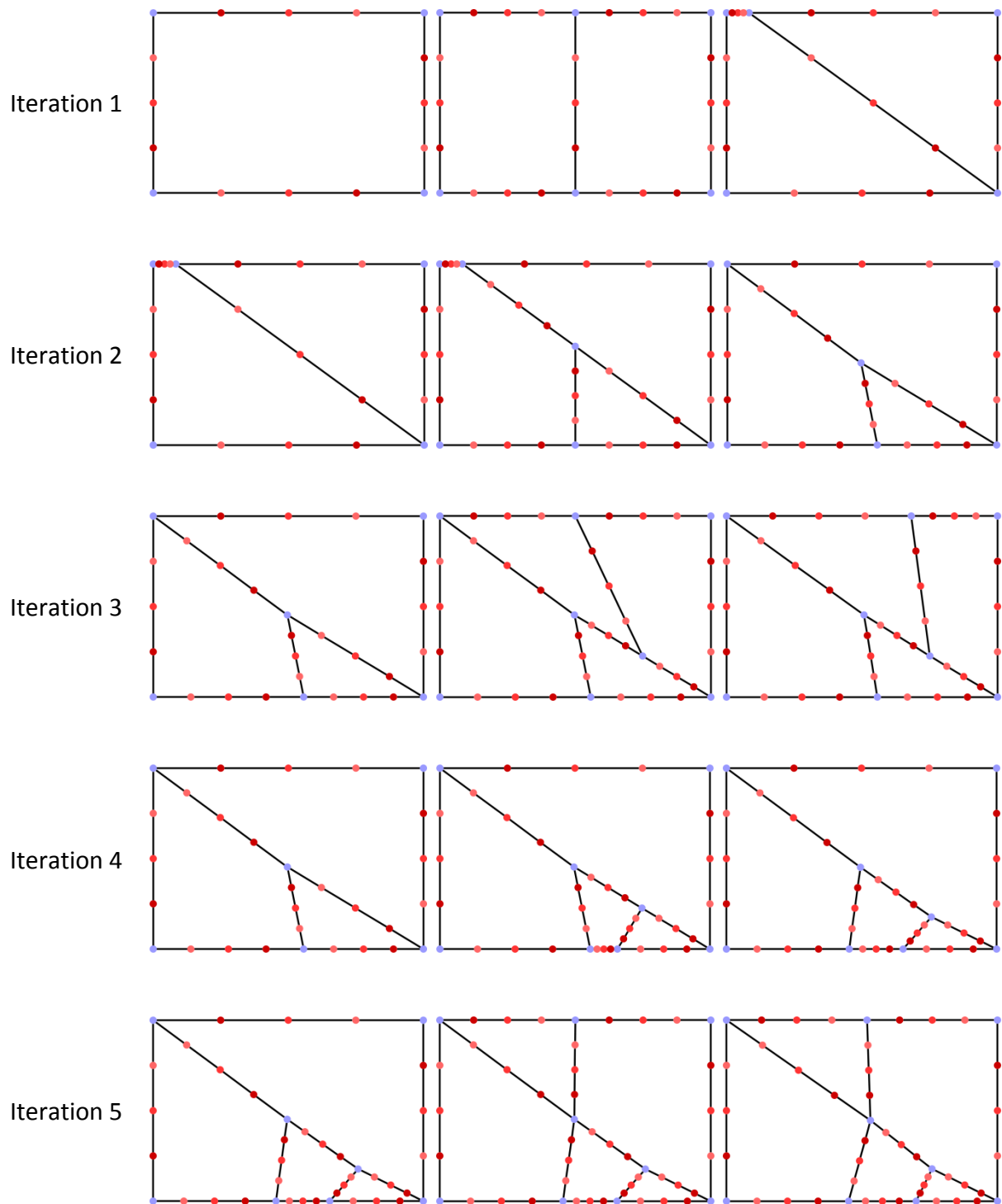


Abbildung II.1.4.13: Anwendungsbeispiel 1 - Iteration 1 - 5

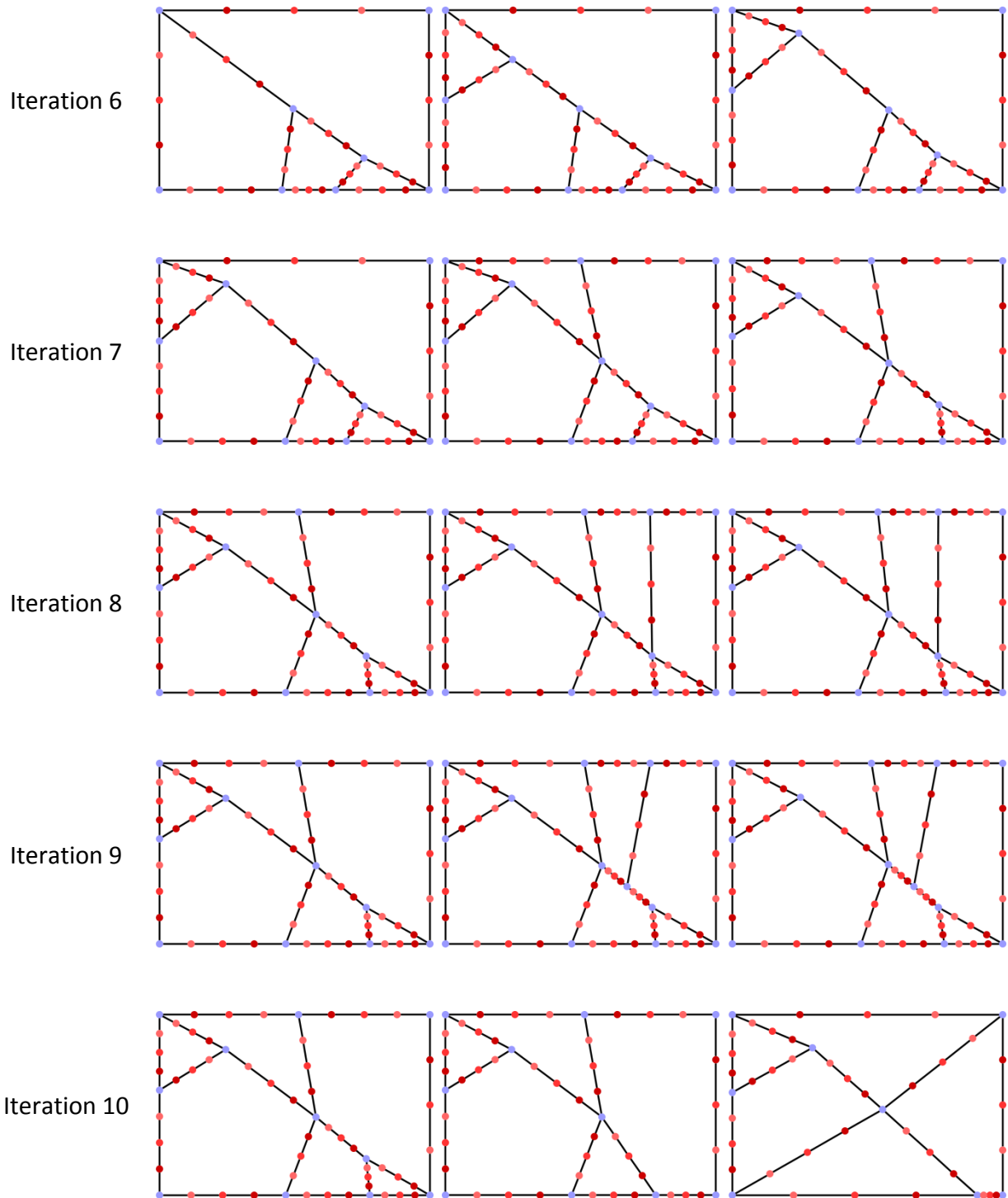


Abbildung II.1.4.14: Anwendungsbeispiel 1 - Iteration 6 - 10

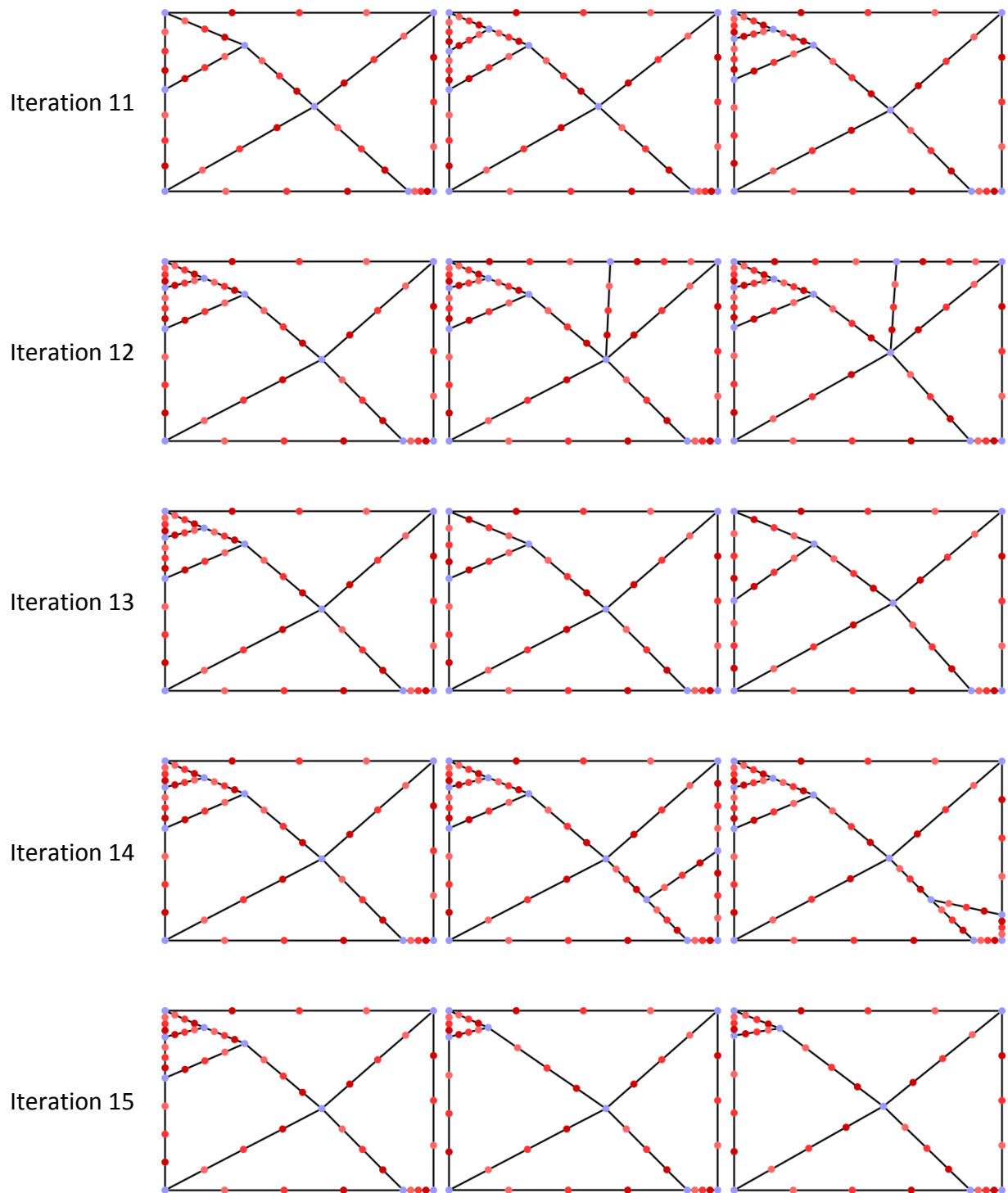


Abbildung II.1.4.15: Anwendungsbeispiel 1 - Iteration 11 - 15

	Heuristiken	Intrusion [mm]	$v_{end,y}$ [m/s]	Masse [g]	Dicke [mm]
Start	-	42,75	-4,045	27	4
Iteration 1	SFDW + SWT	9,852	-1,975	27	2,985
Iteration 2	SFDW + SWT	8,886	-2,344	27	2,752
Iteration 3	BED + SWT	8,891	-1,457	27	2,49
Iteration 4	SFDW + SWT	7,143	-2,364	27	2,67
Iteration 5	SFDW + SWT	7,451	-2,174	27	2,49
Iteration 6	BED + SWT	6,846	-2,971	27	2,50
Iteration 7	SFDW + SWT	6,172	-2,340	27	2,36
Iteration 8	SFDW + SWT	6,257	-2,802	27	2,16
Iteration 9	BED + SWT	6,229	-2,452	27	2,18
Iteration 10	RSC + SWT	5,592	-2,348	27	2,22
Iteration 11	BED + SWT	4,569	-1,871	27	2,17
Iteration 12	SFDW + SWT	4,687	-2,208	27	2,06
Iteration 13	RSC + SS + SWT	4,603	-2,043	27	2,21
Iteration 14	BED + SWT	4,698	-2,442	27	2,08
Iteration 15	DUW + SS+ SWT	4,801	-2,258	27	2,29

Tabelle II.1.4.b: Anwendungsbeispiel 1 - Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse

Abbildung II.1.4.16 zeigt den Startentwurf und den optimalen Entwurf zum jeweiligen Zeitpunkt der maximalen Deformation. Der diagonale Lastpfad des optimalen Entwurfs nimmt den größten Teil der Energie auf. Außerdem werden durch die Verbindungen mit der Einspannung Kräfte direkt in die Einspannung eingeleitet. Der obere (positive y-Richtung) Teil des Aluminiumrahmens vollführt eine Ausgleichsbewegung und bewegt sich dem einschlagenden Würfel entgegen.

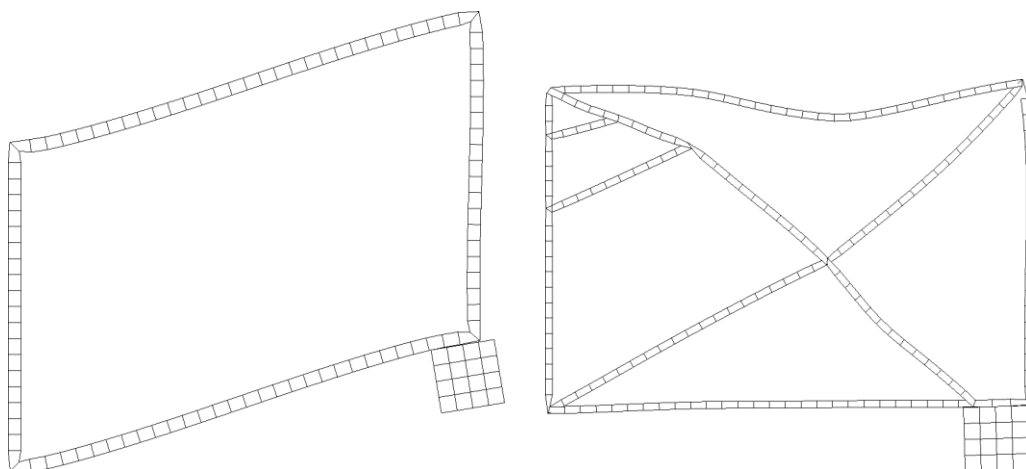


Abbildung II.1.4.16: Anwendungsbeispiel 1 - Startentwurf (li.) und Optimum (re.) zum Zeitpunkt der maximalen Deformation

Anwendungsbeispiel 2 – Prozesskettenmodell

Dieses Anwendungsbeispiel umfasst Optimierungen mit drei einfachen Lastfällen. Die zu optimierende Struktur ist ein Ausschnitt aus einem Aluminium-Fahrzeugschweller mit einer Länge von 600 mm.

Im ersten Lastfall, welcher an den *EURO-NCAP* Pfahlaufprall angelehnt ist, ist der Schwellerausschnitt noch mit einem Ausschnitt des Sitzquerträgers verbunden und wird mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 29 km/h in negative y-Richtung gegen einen starren Pfahl bewegt (Abbildung II.1.4.17). Um dem Lastfall noch zusätzliche Energie hinzuzufügen, befindet sich an dem anderen Ende des Sitzquerträgersausschnitts eine starre Wand, welche sich ebenfalls mit 29 km/h und einer Masse von 85 kg in negative y-Richtung bewegt. Aufgrund der geringen Modellgröße muss die Bewegung des Schwellerausschnitts geführt werden. Dies geschieht, indem an dem Ende des Sitzquerträgersausschnitts, an welchem sich auch die starre Wand befindet, alle Translationen und Rotationen mit Ausnahme der Translation in y-Richtung gesperrt werden. Außerdem werden an den Enden des Schwellerausschnitts die Translationen in z-Richtung restringiert, damit ein Abknicken des Schwellerausschnitts in z-Richtung verhindert wird. Die anderen beiden Lastfälle sind linear statisch. Ein Ende des Schwellerausschnitts ist hierbei eingespannt, während an dem anderen Ende über eine Spinne aus starren Balkenelementen in Lastfall 2 (Biegung) eine Last von 1000 N in negative z-Richtung und in Lastfall 3 (Torsion) ein Moment von 500 Nm um die x-Achse aufgebracht wird. Die gesamte Struktur wird mit Schalenelementen mit einer Elementkantenlänge von 5 mm diskretisiert.

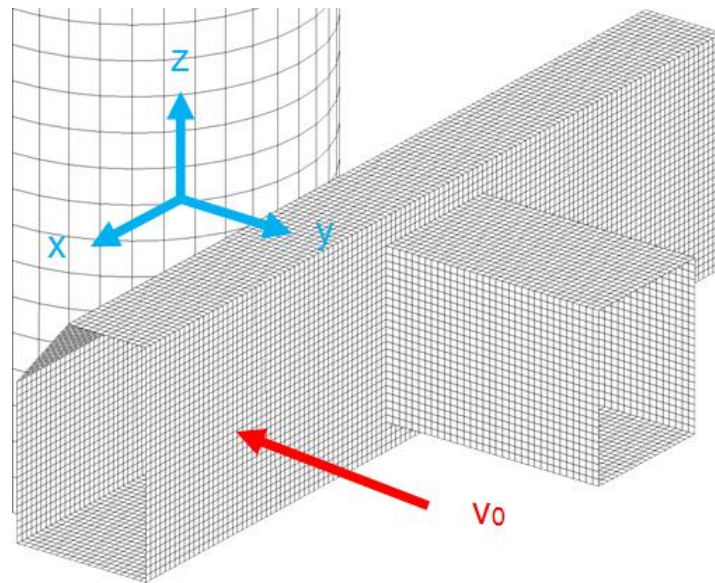


Abbildung II.1.4.17: Anwendungsbeispiel 2 - Lastfall 1

Die Fertigungsrestriktionen orientieren sich an dem Herstellungsprozess der für den Schweller und den Sitzquerträger verwendeten Aluminiumstrangpressprofillegierung EN AW-6005 T6. Die minimale Wanddicke beträgt 1,6 und die maximale 3,5 mm. Der minimale Verbindungswinkel zwischen zwei Wänden beträgt 15° und der Mindestabstand 10 mm.

Anwendungsbeispiel 2a

Die Spezifikationsliste dieses Anwendungsbeispiels ist in Tabelle II.1.4.c zusammengefasst. Das Ziel der Optimierung ist die Minimierung der maximal auftretenden Reaktionskraft an der schiebenden, starren Wand, welche sich an dem Ende des Sitzquerträgerstücks befindet. Durch dieses Optimierungsziel wird ein möglichst gleichmäßiger Kraft-Zeit-, bzw. Kraft-Weg-Verlauf angestrebt, da die Struktur gezwungen ist, die gesamte kinetische Energie des Lastfalls aufzunehmen, aber das Kraftmaximum möglichst gering sein soll. Die funktionalen Restriktionen orientieren sich an dem Startentwurf der Optimierung, also an einem leeren Schwellerprofil mit einer Wanddicke von 3,5 mm. Dessen Masse von 2,801 kg darf während der Optimierung nicht überschritten werden. Außerdem muss die Steifigkeit des optimalen Entwurfs in den Lastfällen 2 und 3 mindestens 50 % der Steifigkeit des Startentwurfs betragen. Dieser Spielraum bei der Steifigkeit ist notwendig, da das Ausgangsprofil mit seiner Wanddicke von 3,5 mm eine unrealistisch hohe Steifigkeit in diesen beiden Lastfällen besitzt. Die Intrusion

des Schwellerausschnitts wird ebenfalls restringiert, um zu berücksichtigen, dass in der industriellen Auslegung von crashbelasteten Strukturen im Sinne der Robustheit in der Regel nicht der gesamte zur Verfügung stehende Deformationsraum genutzt wird.

Für die Optimierungsprozedur wurden 7580 Funktionsaufrufe durchgeführt. Ca. für 30 % dieser Funktionsaufrufe mussten keine FE-Simulationen durchgeführt werden, da die Fertigungsrestriktionen nicht erfüllt wurden.

Optimierungsziel:	Minimierung des maximal auftretenden Betrags der Reaktionskraft an der starren, schiebenden Wand in Lastfall 1
Entwurfsvariablen:	Topologie, Gestalt und Wanddicke des Profilquerschnitts des Schwellers
Funktionale Restriktionen:	Masse des Schwellerausschnitts $\leq 2,801$ kg
	Intrusion des Schwellerausschnitts in Lastfall 1 ≤ 70 mm
	Betrag der Translation des Lastangriffspunkts in Lastfall 2 in z-Richtung $\leq 0,3867$ mm
	Betrag der Rotation des Lastangriffspunkts in Lastfall 3 in x-Richtung $\leq 3,5544 * 10^{-3}$
Fertigungsrestriktionen:	$1,6\text{mm} \leq \text{Wanddicke der Struktur} \leq 3,5$ mm
	Verzweigungswinkel zwischen zwei Wänden $\geq 15^\circ$
	Abstand zwischen zwei Wänden ≥ 10 mm

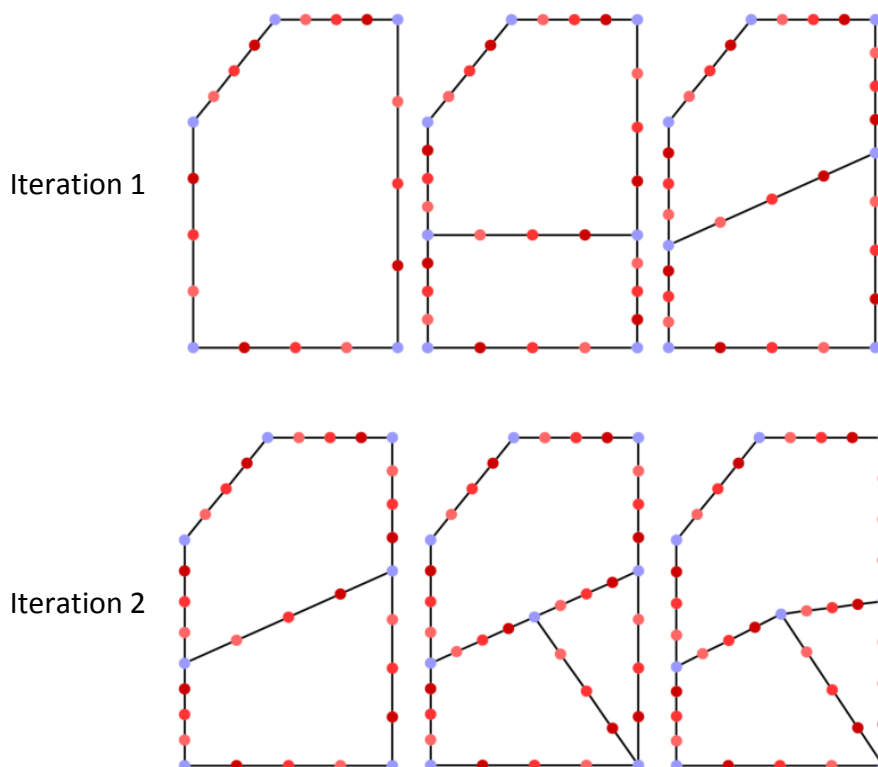
Tabelle II.1.4.c: Anwendungsbeispiel 2a - Spezifikationsliste

Eine grafische Darstellung der Optimierungshistorie bietet Abbildung II.1.4.18. Für jede Iteration der durchgeführten Optimierungsprozedur sind der Startentwurf (links), der Stand nach der äußeren Optimierungsschleife (mittig) und der Stand nach der inneren Optimierungsschleife (rechts) dargestellt. Der Optimale Entwurf wird in der vierten Iteration gefunden, da in den darauffolgenden zwei Iterationen die Zielfunktion nicht weiter verbessert werden kann.

Die Tabelle II.1.4.d fasst die Historie der Zielfunktion und der Restriktionen zusammen, wobei die Translations- und die Rotationsrestriktion in den Lastfällen 2 und 3 in eine Steifigkeitsrestriktion umgewandelt worden ist, welche sich auf den Startentwurf bezieht. Prinzipiell lassen sich in der Optimierungshistorie mehrere Trends erkennen. Mit fortschreitender Komplexität der Struktur nehmen die Wanddicke und die Masse des Bauteils ab, was dazu führt, dass die Torsions- und die Biegesteifigkeit in den Lastfällen 2 und 3 ebenfalls sinkt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit fortschreitender Optimierungsdauer immer mehr

Masse vom Außenbereich der Struktur in den Innenbereich der Struktur transferiert wird, was die für die Steifigkeitswerte ausschlaggebenden Flächenträgheitsmomente reduziert.

Allerdings wird mit fortschreitender Optimierungsdauer auch die Zielfunktion immer geringer, da sich effiziente, Energie absorbierende Abstützungsmechanismen im Inneren der Struktur ausbilden. In Iteration 4 hat sich die Zielfunktion gegenüber dem Startentwurf unter Einhaltung aller Restriktionen um 22,21 % verbessert. Die Resultate der einzelnen Iterationen befinden sich dicht an der Grenze der Intrusionsrestriktion in Lastfall 1. Dies ist plausibel, da für eine möglichst minimale maximal auftretende Reaktionskraft an der starren, schiebenden Wand im ersten Lastfall der gesamte zur Verfügung stehende Deformationsraum genutzt werden muss.



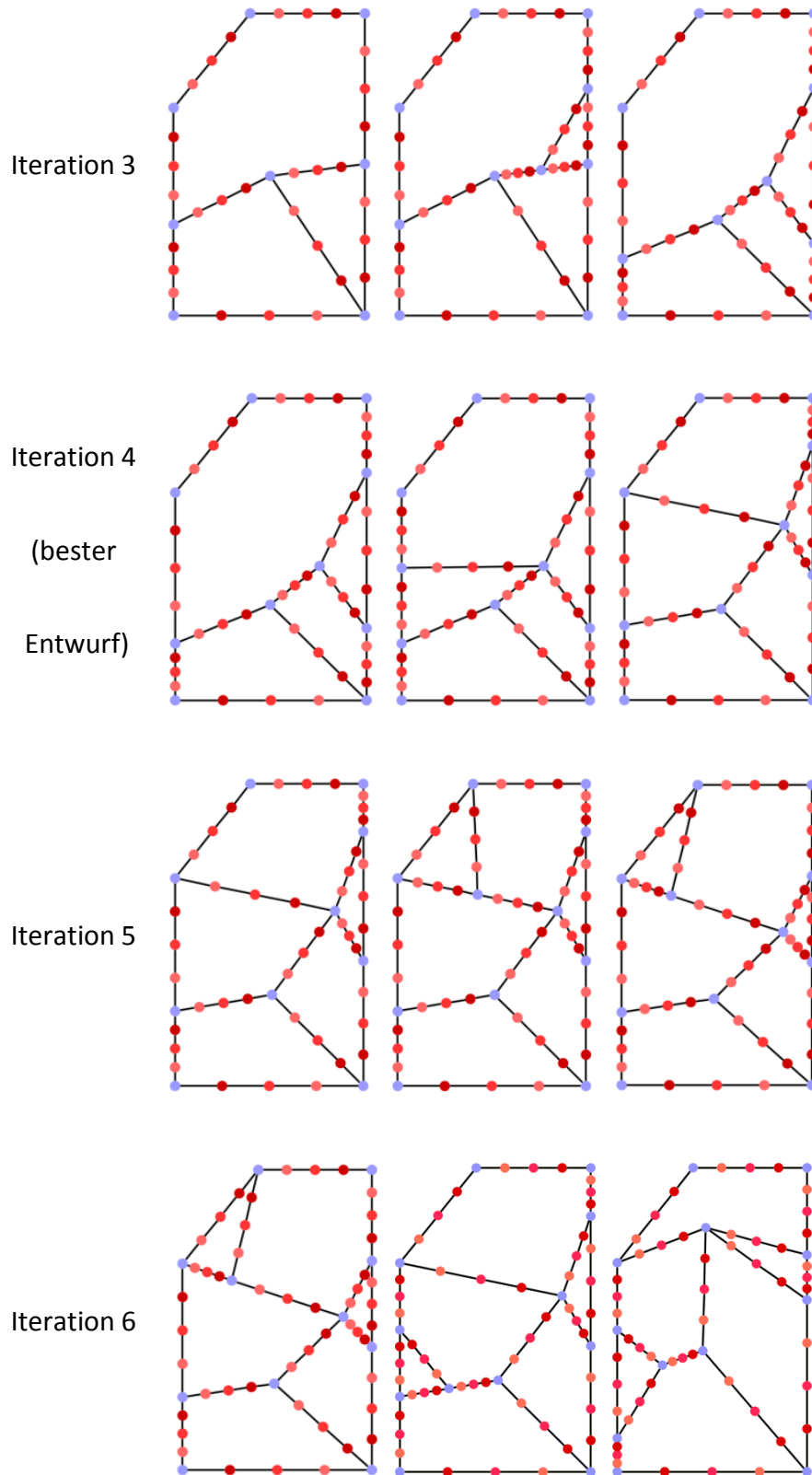


Abbildung II.1.4.18: Anwendungsbeispiel 2a - Iteration 1 – 6

	Heuristiken	Max.Kraft [kN]	Biegesteifigkeit [%]	Torsionssteifigkeit [%]	Masse [kg]	Intrusion [mm]	Wanddicke [mm]
Start	-	55,82	100	100	2,801	69,03	3,50
Iteration 1	SFDW + SWT	47,83	66,88	66,54	2,278	68,75	2,33
Iteration 2	SFDW + SWT	47,52	64,50	58,44	2,278	68,84	2,04
Iteration 3	BED + SWT	45,81	65,27	57,46	2,348	69,61	1,94
Iteration 4	SFDW + SWT	43,42	62,44	53,76	2,364	69,95	1,75
Iteration 5	SFDW + SWT	43,51	61,88	50,06	2,288	69,60	1,63
Iteration 6	BED + SWT	44,20	72,01	55,59	2,425	69,85	1,76

Tabelle II.1.4.d: Anwendungsbeispiel 2a - Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse

Abbildung II.1.4.19 zeigt einen Vergleich der Zustände des Startentwurfs und des Optimums aus Iteration 4 zum Zeitpunkt der maximalen Deformation in Lastfall 1. Ein Vergleich der Reaktionskräfte an der starren, schiebenden Wand hingegen ist in Abbildung II.1.4.20 zu finden. Es ist erkennbar, dass das der optimale Entwurf aus Iteration 4 tatsächlich einen fast optimalen Kraft-Zeit-Verlauf besitzt. Die Kraft steigt sehr rasch auf ein Niveau von ca. 43 kN an und dieses Kraftniveau wird dann solange nahezu konstant aufrecht erhalten, bis die Entlastung der Struktur einsetzt und die Reaktionskraft an der starren, schiebenden Wand wieder den Wert 0 annimmt.

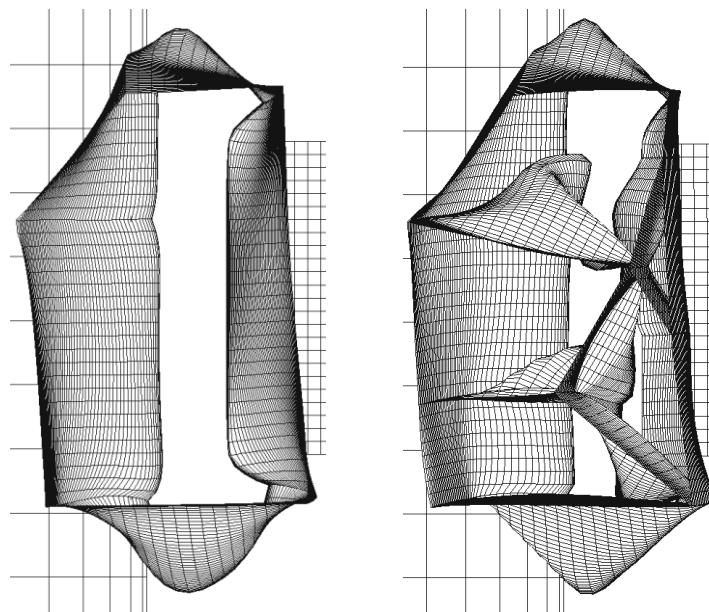


Abbildung II.1.4.19: Anwendungsbeispiel 2a - Startentwurf (li.) und Optimum (re.) zum Zeitpunkt der maximalen Deformation in Lastfall 1

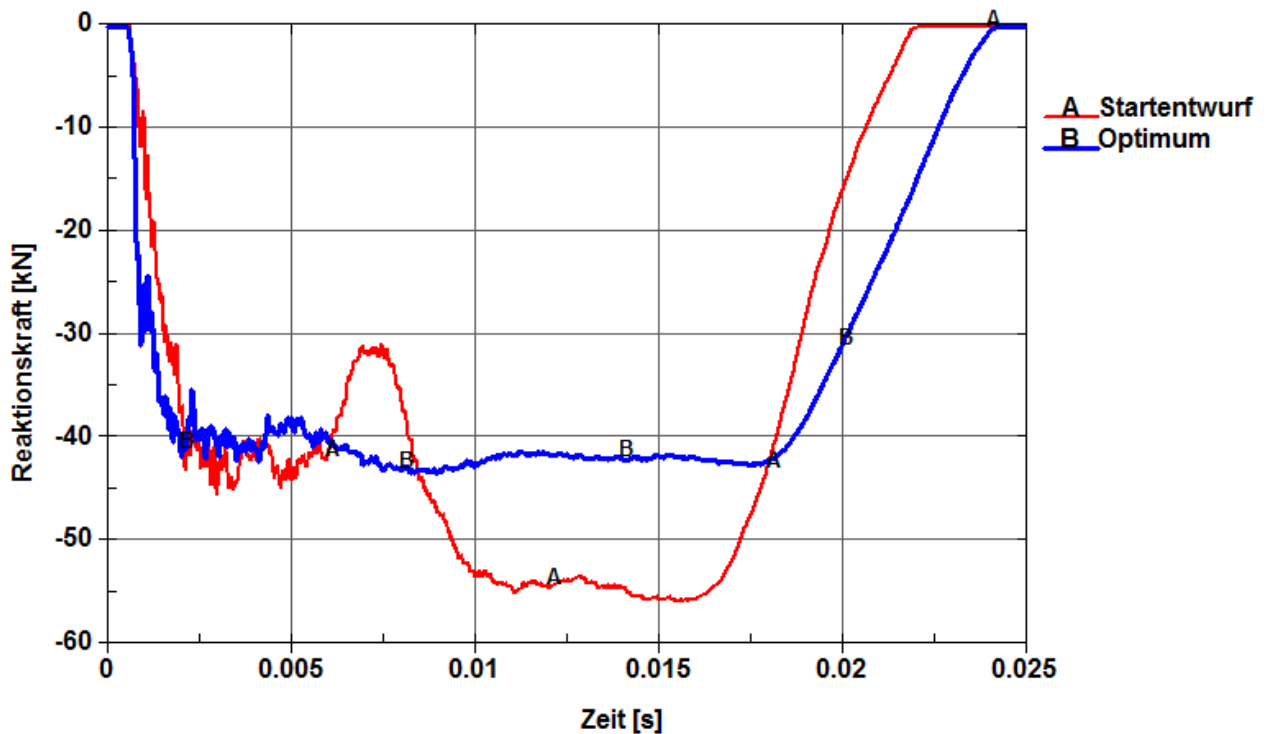


Abbildung II.1.4.20: Anwendungsbeispiel 2a - Reaktionskraft der starren, schiebenden Wand in Lastfall 1

Anwendungsbeispiel 2a - Weiterführende Gestaltoptimierung und Dimensionierung

In der im vorigen Abschnitt vorgestellten Optimierungsprozedur wurde für die Struktur nur ein einzige Wanddicke verwendet, um die Anzahl der Entwurfsvariablen in der inneren Optimierungsschleife möglichst gering zu halten. Um er ermitteln, wie viel Optimierungspotenzial durch diese Einschränkung verloren geht, wird das Ergebnis der vorherigen Optimierungsprozedur für eine weitere Gestaltoptimierung und Dimensionierung verwendet, bei welcher nun aber jede einzelne Wand des Profilquerschnitts eine eigene Wanddicke besitzen darf. Aufgrund der hohen Anzahl an Entwurfsvariablen (21) werden insgesamt 6300 Funktionsaufrufe durchgeführt.

Abbildung II.1.4.21 zeigt die Veränderung der Gestalt und der Wanddicken des Profilquerschnitts durch die Optimierung. Während sich die Gestalt der Struktur nur minimal verändert hat, ist bei den Wanddicken deutlich sichtbar, dass dem zur Lastrichtung schrägen Teil der äußeren Kontur eine wesentlich höhere Wanddicke zugewiesen wurde. In Tabelle II.1.4.e sind die Einflüsse der Veränderungen auf das mechanische Verhalten der Struktur

zusammengefasst. Durch die Verstärkung des oberen, schrägen Bereiches erhöht sich zwar die Masse der Struktur um ca. 1,44 %, jedoch kann dadurch die Zielfunktion um weitere 1,91 % reduziert werden.

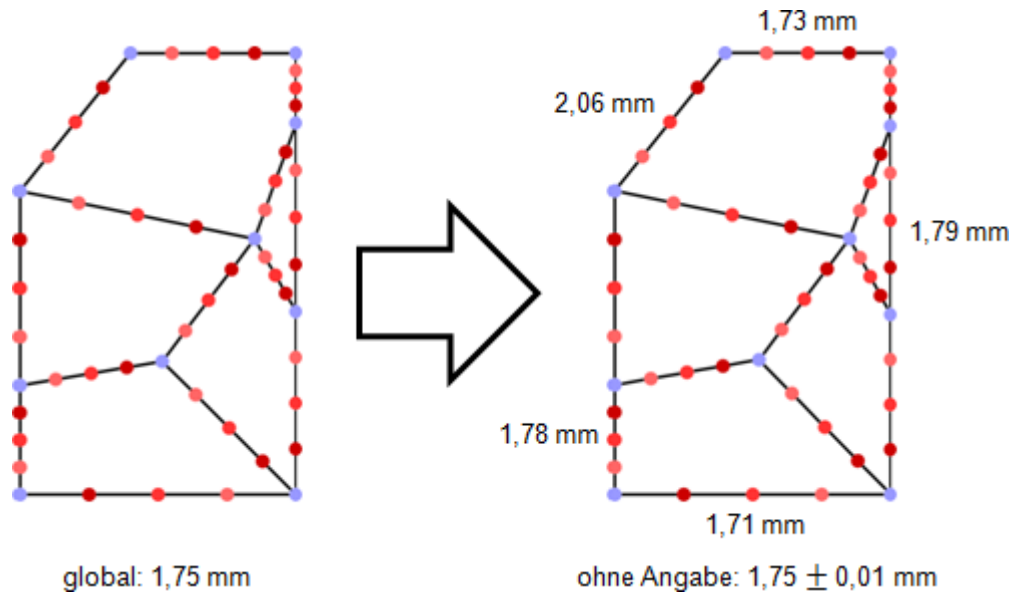


Abbildung II.1.4.21: Anwendungsbeispiel 2a - Veränderung des Optimums bei der Verwendung von individuellen Wanddicken

	Max. Kraft [kN]	Biegesteifigkeit [%]	Torsionssteifigkeit [%]	Masse [kg]	Intrusion [mm]
Start	43,42	62,44	53,76	2,364	69,95
Optimum	42,59	63,37	54,73	2,398	70,00

Tabelle II.1.4.e: Anwendungsbeispiel 2a - Veränderung des Optimums bei der Verwendung von individuellen Wanddicken

Anwendungsbeispiel 2b - Verwendung eines voroptimierten Startentwurfs

Der Lösungsraum eines Optimierungsproblems, welches Crash-Lastfälle berücksichtigt, beherbergt in der Regel viele lokale Optima und es stellt sich die Frage, ob durch die Verwendung eines voroptimierten Startentwurfs im Vergleich mit einem hohlen Profilquerschnitt als Startentwurf Rechenzeit gespart werden kann oder gar ein besseres Ergebnis erreicht werden kann.

Die in diesem Abschnitt vorgestellte Optimierungsprozedur gleicht Anwendungsbeispiel 2a, lediglich der Startentwurf unterscheidet sich. Durch die identische dynamische Berechnung der Anzahl der maximalen Funktionsaufrufe für jeden Durchlauf der inneren Optimierungsschleife können die verbrauchten Rechenzeiten miteinander verglichen werden.

Der voroptimierte Startentwurf wird durch die Verwendung der *HCA-Methode* erzeugt (Details: siehe Abschnitt II.1.2). Hierfür wird der gesamte zur Verfügung stehende Entwurfsraum mit Volumenelementen mit einer Elementkantenlänge von 5 mm gefüllt und die Struktur unter einer Intrusionsrestriktion und der maximalen Füllung des Entwurfsraums von 25 % optimiert. Die Entwurfsvariablen sind derart miteinander gekoppelt, dass der Profilquerschnitt der Struktur über die gesamte Länge des Schwellers konstant bleibt. Die äußere Kontur des Schwellers ist mit Schalenelementen diskretisiert, die eine Wanddicke von 1 mm aufweisen. Das Ergebnis dieser Optimierung mit seiner Verteilung der künstlichen Dichte ist in Abbildung II.1.4.22 dargestellt.

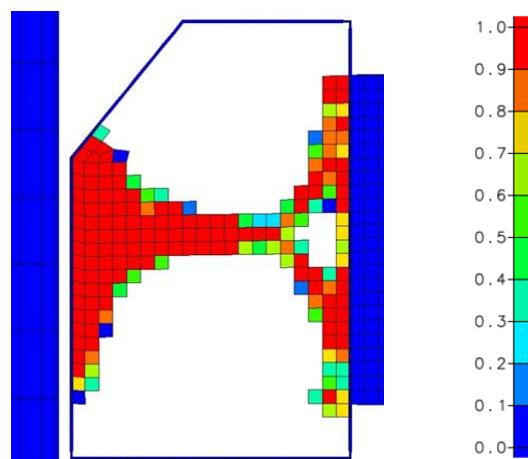


Abbildung II.1.4.22: Ergebnis der Voroptimierung mit der HCA-Methode

Das Ergebnis der Voroptimierung muss zunächst interpretiert werden und kann nicht direkt verwendet werden, da die entstandene Struktur nicht dünnwandig ist. Der Entwurf wurde von dem Projektpartner *DYNAmore GmbH* durch die Anwendung der *Hybrid Cellular Automata-Methode* erzeugt, durch eine Software der *SFE GmbH* automatisiert geglättet (Details: siehe Abschnitt II.1.3) und anschließend im Projektkonsortium gemeinsam interpretiert und besprochen.

Mögliche Interpretationen und die wesentlichen mechanischen Eigenschaften dieser Strukturen in dem Lastfall Pfahlaufprall dieses Anwendungsbeispiels sind in Tabelle II.1.4.f und Tabelle II.1.4.g zusammengefasst. Die Wanddicken der Interpretationen sind so gewählt, dass die Intrusion des Schwellers durch den Pfahl sich in einem ähnlichen Bereich befindet, um das Maximum der Reaktionskraft an der schiebenden, starren Wand miteinander vergleichen zu können. Die oberste Interpretationsvariante in Tabelle II.1.4.f weist das beste mechanische Verhalten auf und wird daher für die nachfolgende *Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung* als Startentwurf verwendet.

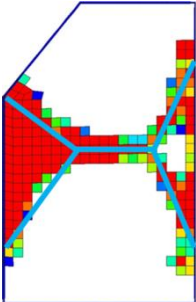
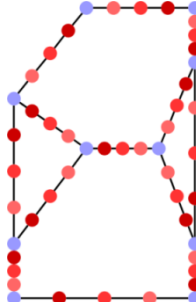
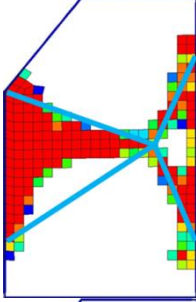
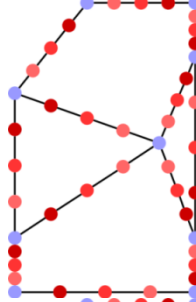
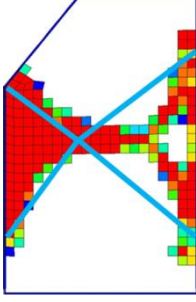
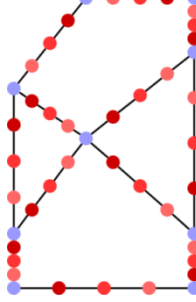
Interpretation	Umsetzung	Max. Kraft [kN]	Intrusion [mm]
		45,98	67,51
		49,43	66,68
		56,03	65,60

Tabelle II.1.4.f: Interpretationen des Ergebnisses der Voroptimierung Teil 1

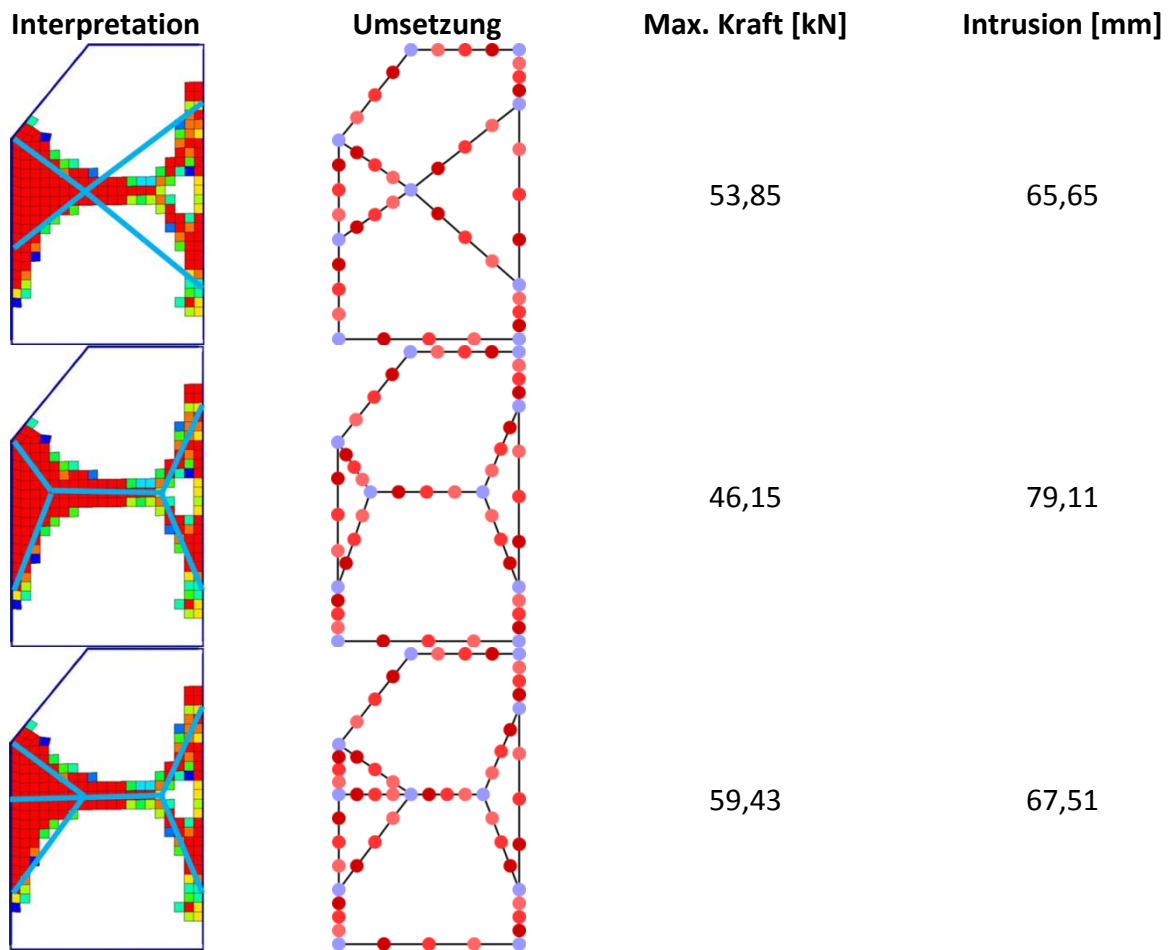
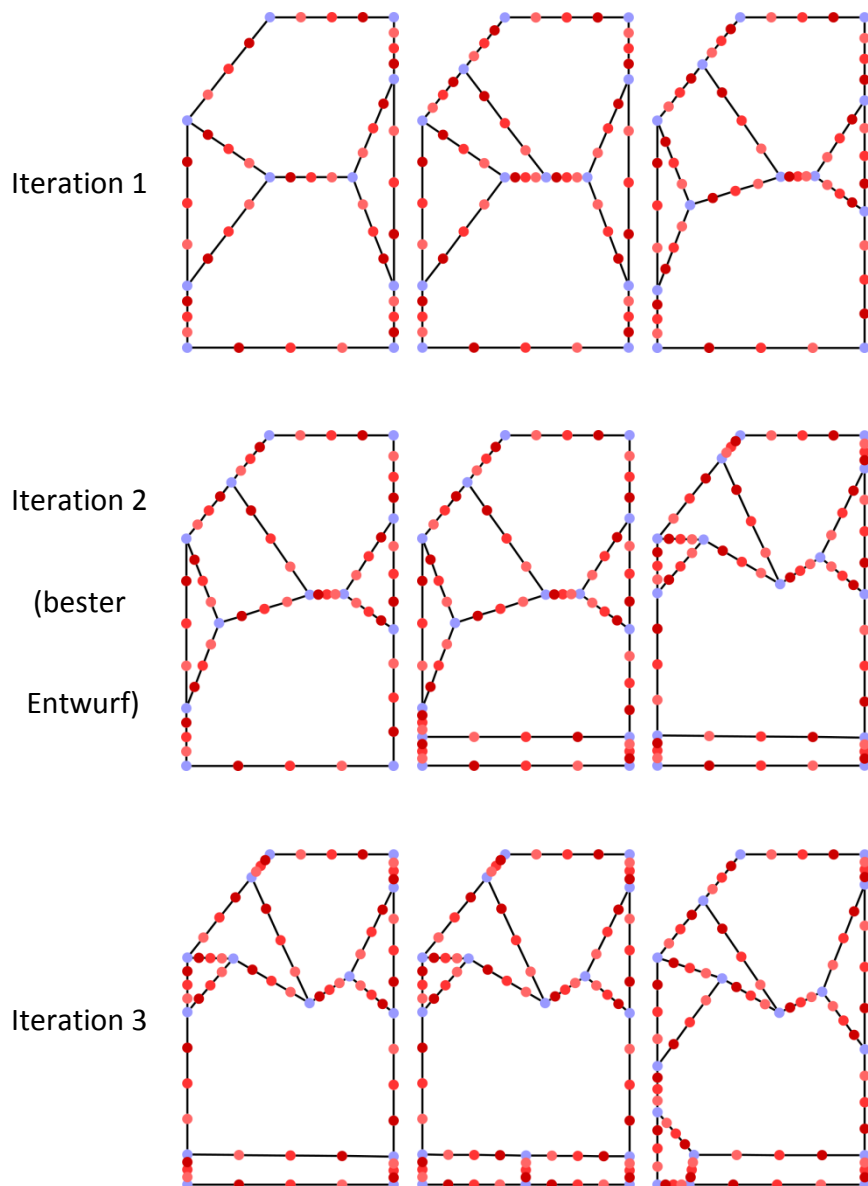


Tabelle II.1.4.g: Interpretationen des Ergebnisses der Voroptimierung Teil 2

Die strukturellen Veränderungen des Profilquerschnitts sind in Tabelle II.1.4.g dargestellt und eine Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse erfolgt in Abbildung II.1.4.23. In der Abbildung befindet sich links der Startentwurf der jeweiligen Iteration, mittig die Struktur nach der Topologieänderung und rechts das Ergebnis. Lediglich in den ersten beiden Iterationen der Optimierungsprozedur konnte die Zielfunktion verbessert werden, da der Startentwurf bereits ein gutes mechanisches Verhalten zeigt. In den darauffolgenden drei Iterationen scheitern alle Heuristiken an einer Verbesserung der Struktur, weswegen die Optimierung nach der fünften Iteration beendet wird und das Optimum in der zweiten Iteration gefunden wird.

Durch die Verwendung eines voroptimierten Startentwurfs wird verglichen mit der Referenz (Optimierungsergebnis mit einem hohlen Profilquerschnitt als Startentwurf) und hinsichtlich der Zielfunktion ein gleichwertiges lokales Optimum erreicht. Die Masse ist um ca. 2,16 % höher, allerdings ist die Biegesteifigkeit um 15,81 % und die Torsionssteifigkeit um 6,16 % größer.

In der Optimierungsprozedur wurden 10000 Funktionsaufrufe durchgeführt, wobei für ca. 20 % der Funktionsaufrufe aufgrund einer Nichteinhaltung der Fertigungsrestriktionen keine *FE-Simulationen* durchgeführt wurden. Verglichen mit dem Optimierungsergebnis mit einem hohlen Profilquerschnitt als Startentwurf wurden also 2420 mehr Funktionsaufrufe benötigt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass durch den komplexeren Startentwurf bereits in den ersten Iterationen eine hohe Anzahl von Entwurfsvariablen vorhanden ist und daher auch in den ersten Iterationen eine wesentlich größere Anzahl an Funktionsaufrufen benötigt wird.



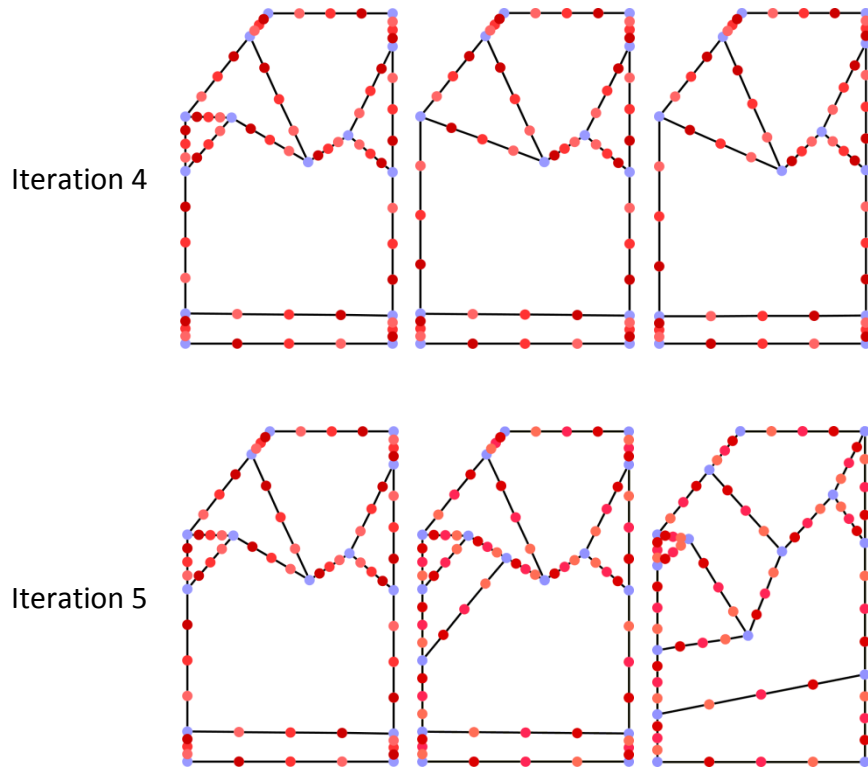


Abbildung II.1.4.23: Anwendungsbeispiel - Iteration 1 - 5

	Heuristiken	Max.Kraft [kN]	Biegesteifigkeit [%]	Torsionssteifigkeit [%]	Masse [kg]	Intrusion [mm]	Wanddicke [mm]
Referenz	-	43,42	62,44	53,76	2,364	69,95	1,75
Start	-	45,98	64,18	60,51	2,450	67,51	2,00
Iteration 1	BED + SWT	44,86	62,84	57,09	2,360	67,12	1,86
Iteration 2	SFDW + SWT	43,48	72,31	57,07	2,415	69,04	1,73
Iteration 3	SFDW + SWT	43,82	71,64	58,73	2,527	69,63	1,71
Iteration 4	RSC + SWT	43,54	72,91	57,72	2,425	69,64	1,80
Iteration 5	BED + SWT	45,22	69,90	54,43	2,588	69,76	1,73

Tabelle II.1.4.h: Anwendungsbeispiel - Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse

Das Deformationsverhalten des Ergebnisses dieser Optimierungsprozedur und des Startentwurfs sind in Abbildung II.1.4.24 gegenübergestellt. Durch die Anordnung der Wände im oberen Teil des Profilquerschnitts entsteht ein Mechanismus, der den zur Lastrichtung schrägen Teil der äußeren Kontur des Profilquerschnitts unter Zug setzt, sobald der Schweller zusammengedrückt wird.

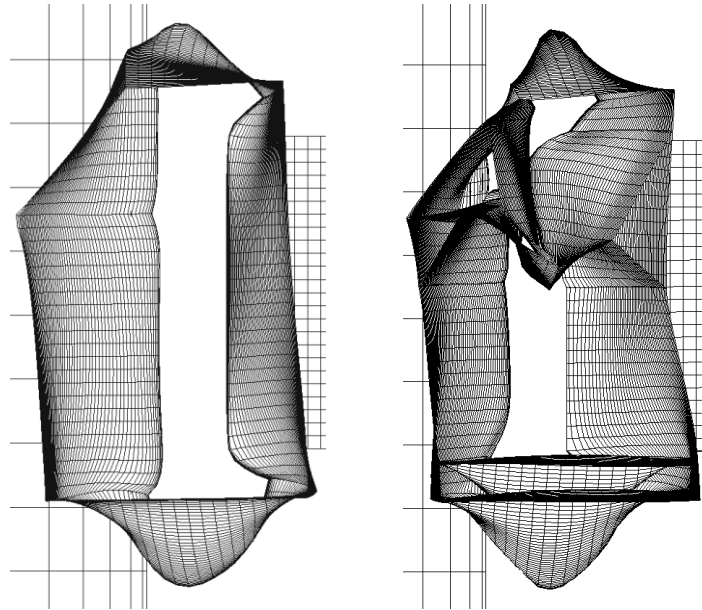


Abbildung II.1.4.24: Anwendungsbeispiel 2b - Startentwurf (li.) und Optimum (re.) zum Zeitpunkt der maximalen Deformation in Lastfall 1

Anwendungsbeispiel 3

Das Analysemodell dieses Anwendungsbeispiels umfasst ein reduziertes Gesamtfahrzeugmodell, welches in einem Pfahlaufprall-Lastfall mit 29 km/h gegen einen starren Pfahl bewegt wird (Abbildung II.1.4.25). Der Aufbau des Lastfalls ist an den EURO-NCAP Pfahlaufprall angelehnt. Die x-Position des Pfahles und damit auch die Aufprallposition wird bestimmt durch die x-Position des Massenschwerpunkts des Kopfes des Fahrer-Dummys. Der Dummy gehört zu der Gruppe "Mann 95. Perzentil" und ist in dem Analysemodell nicht dargestellt.

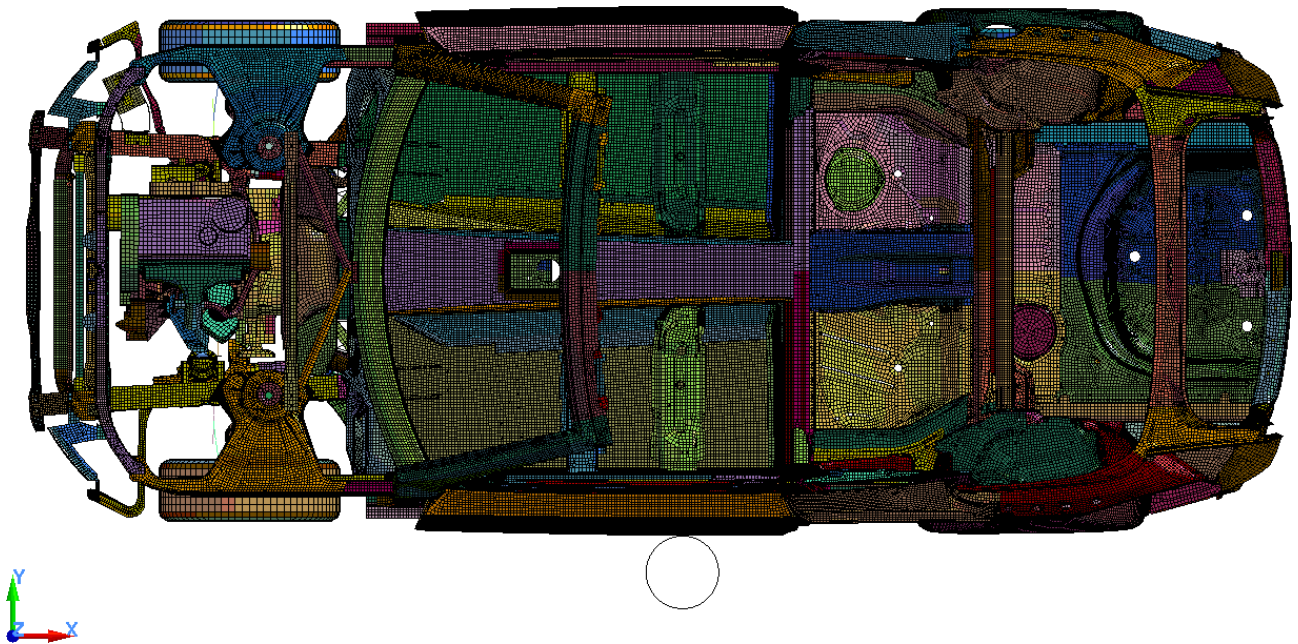


Abbildung II.1.4.25: Anwendungsbeispiel 3 – Analysemodell

Ein Überblick über das mechanische Verhalten des Fahrzeugs zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Simulation gibt Abbildung II.1.4.26.

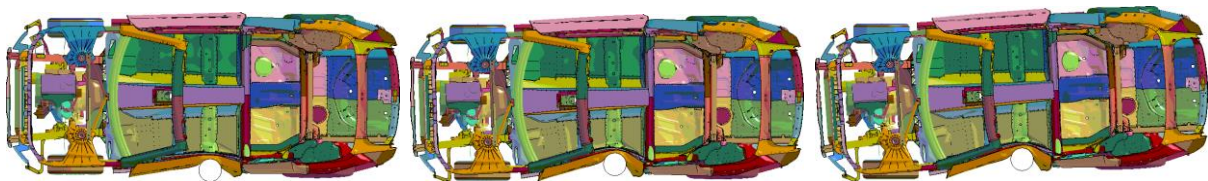


Abbildung II.1.4.26: Anwendungsbeispiel 3 - Strukturverhalten (li. t = 30 ms, mi. t = 60 ms, re. t = 90 ms)

Typische Auswertekriterien sind Kräfte, Momente und Beschleunigungen, die an dem Dummy gemessen werden könnten. Der Pfahlaufprall stellt für die strukturelle Integrität des Fahrzeugs eine hohe Belastung dar und häufig kommt es bei dieser Belastung zu großen Intrusionen der Fahrgastzelle. Aus diesem Grund wird der den Insassen zur Verfügung stehende Überlebensraum oftmals als Auswertekriterium genutzt. Dieser wird in diesem Anwendungsbeispiel gemessen zwischen den beiden Punkten des Tunnels und des Türinnenblechs, die den geringsten Abstand durch die Intrusion des Pfahls zueinander aufweisen.

In diesem Anwendungsbeispiel soll der Profilquerschnitt des Schwellers des Fahrzeugs optimiert werden. Als Startentwurf hierfür wird ein komplett hohler Profilquerschnitt (Abbildung II.1.4.27 links) verwendet, dessen äußere Kontur jedoch vorgegeben ist. Als Referenzentwurf wird der ursprüngliche Profilquerschnitt des Schwellers (Abbildung II.1.4.27 rechts) verwendet, welcher in seinem Inneren bereits aufwändige Verstrebungen aufweist und dessen Wände Wanddicken von 2 bis 2,75 mm aufweisen.

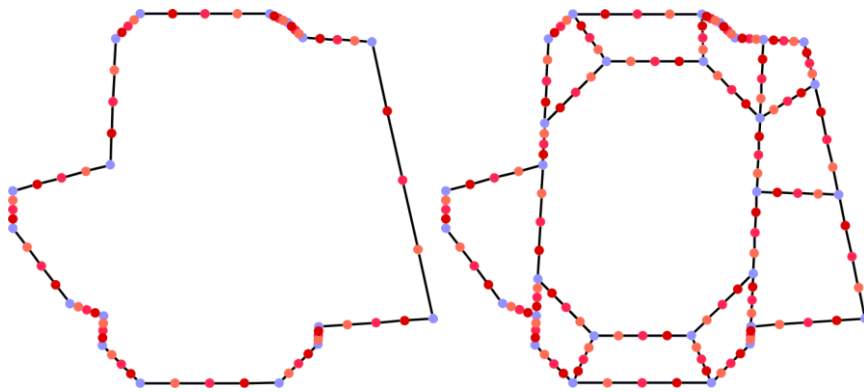


Abbildung II.1.4.27: Anwendungsbeispiel 3 - Graphen des Startentwurfs (li.)
und des Referenzentwurfs (re.)

Für die Durchführung der Optimierungsprozedur wird der Schweller in drei Bereiche aufgeteilt, da das Schwellerprofil nicht über die gesamte Länge der Struktur topologisch konstant ist. Im hinteren Bereich des Schwellers existiert eine Aussparung für die Anbindung an das Radhaus. Dieser hintere Bereich wird in der Optimierung nicht verändert und ist über eine Spinne aus starren Balkenelementen mit dem vorderen, variablen Teil des Schwellers verbunden. Der Flansch des Schwellers ist ebenfalls nicht über die gesamte Länge des Schwellers konstant, ist daher nicht Bestandteil des zu optimierenden Schwellerprofils und wird nachträglich mit dem Schweller verbunden. Abbildung II.1.4.28 zeigt die einzelnen Bestandteile des Schwellers. Grün eingefärbt ist der in der Optimierungsprozedur veränderliche Bereich des Schwellers, blau der nicht veränderliche Teil und rot der Flansch.

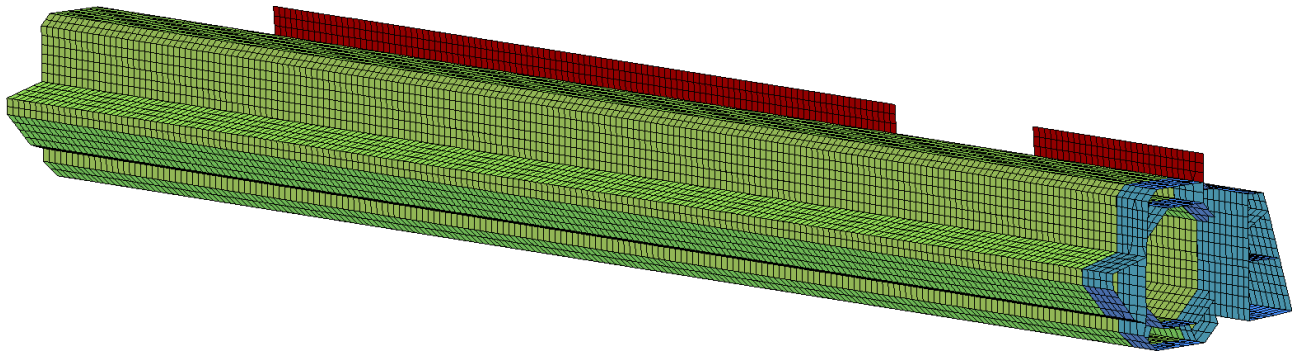


Abbildung II.1.4.28: Anwendungsbeispiel 3 - Trennung des Schwellers

Die durchschnittliche Elementkantenlänge des *FE-Modells* beträgt 10 mm und es weist ca. 739000 Finite-Elemente auf. Für die Berechnung der Entwürfe während der Optimierung wird eine *CRAY XE6* (113664 Berechnungs-CPU's) des *Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS)* verwendet. Jede Simulation benutzt parallelisiert 128 CPUs und benötigt aufgrund eines vorgegeben Zeitschritts von 0,65 μ s und der Verwendung von Massenskalierung etwa 80 min bis zur Komplettierung. Im Optimierungsprozess werden maximal 15 Funktionsaufrufe parallel berechnet.

Anwendungsbeispiel 3a

In dieser Optimierungsprozedur soll die Masse des Schwellers minimiert werden, während der Überlebensraum der Fahrzeuginsassen im Vergleich zum Referenzentwurf erhalten bleibt. Die vollständige Definition des Optimierungsproblems ist in Tabelle II.1.4.i zusammengefasst. Als Startentwurf wird ein hohler Profilquerschnitt (siehe Abbildung II.1.4.29) verwendet, dessen Wanddicke 6 mm beträgt. Die Wanddicke wird so hoch gewählt, damit die funktionale Restriktion zu Beginn der Optimierung nicht verletzt ist.

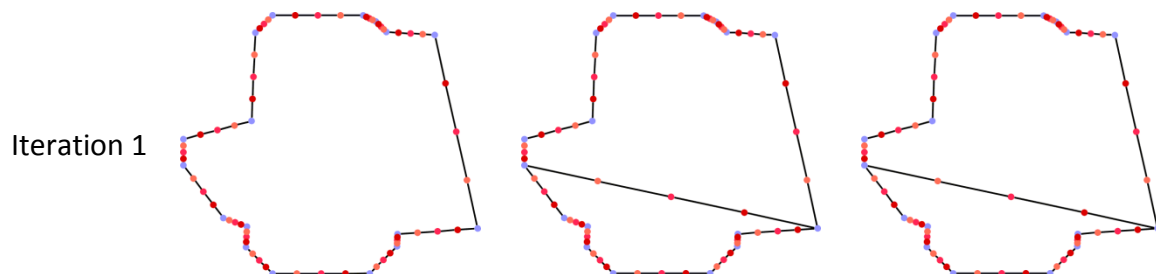
Optimierungsziel:	Minimierung der Masse des Schwellers
Entwurfsvariablen:	Topologie, Gestalt und Wanddicke des Profilquerschnitts des Schwellers
Funktionale Restriktionen:	Überlebensraum $\geq 471,8$ mm
Fertigungsrestriktionen:	$1,6 \text{ mm} \leq \text{Wanddicke der Struktur} \leq 6 \text{ mm}$
	Verzweigungswinkel zwischen zwei Wänden $\geq 15^\circ$
	Abstand zwischen zwei Wänden $\geq 10 \text{ mm}$

Tabelle II.1.4.i: Anwendungsbeispiel 3a - Spezifikationsliste

Die strukturellen Änderungen des Profilquerschnitts des Schwellers während der Optimierungsprozedur illustrieren Abbildung II.1.4.29 und Abbildung II.1.4.30. Der Startentwurf der jeweiligen Iteration ist im linken Teil der Abbildung, der Zustand nach der Topologieänderung in der Mitte und das Ergebnis der Iteration auf der rechten Seite abgebildet. Die Optimierungshistorie wird zusammengefasst durch Tabelle II.1.4.j. Die Angaben zur Masse und Energieaufnahme beziehen sich ausschließlich auf den variablen Teil des Schwellers.

In der Optimierungsprozedur wurden insgesamt elf Iterationen durchgeführt. In den Iterationen 3, 5, 7 sowie 9 - 11 konnte keine Verbesserung der Zielfunktion erreicht werden, weswegen das Optimum in der achten Iteration gefunden wurde. Die topologischen Änderungen werden durch die Heuristik *Ausnutzen des Deformationsraums* dominiert und es bilden sich Verbindungen zwischen den Ecken des Profilquerschnitts, die in den Iterationen 6 und 8 durch die Heuristik *Abstützen sich schnell deformierender Wände* abgestützt werden. Die Masse des variablen Teils des Schwellers konnte von 17,403 kg auf 12,768 kg um 26,63 % gesenkt werden. Im Vergleich mit dem Referenzentwurf beträgt die Reduzierung der Masse 12,26 %. Die Wanddicke des Optimums beträgt 2,42 mm. Die Energieabsorption der variablen Teils des Schwellers schwankt in der Optimierungsprozedur, da je nach Beschaffenheit des Schwellers die umliegenden Komponenten unterschiedliche Mengen an Energie aufnehmen.

Insgesamt wurden in dieser Optimierungsprozedur 3220 Funktionsaufrufe durchgeführt.



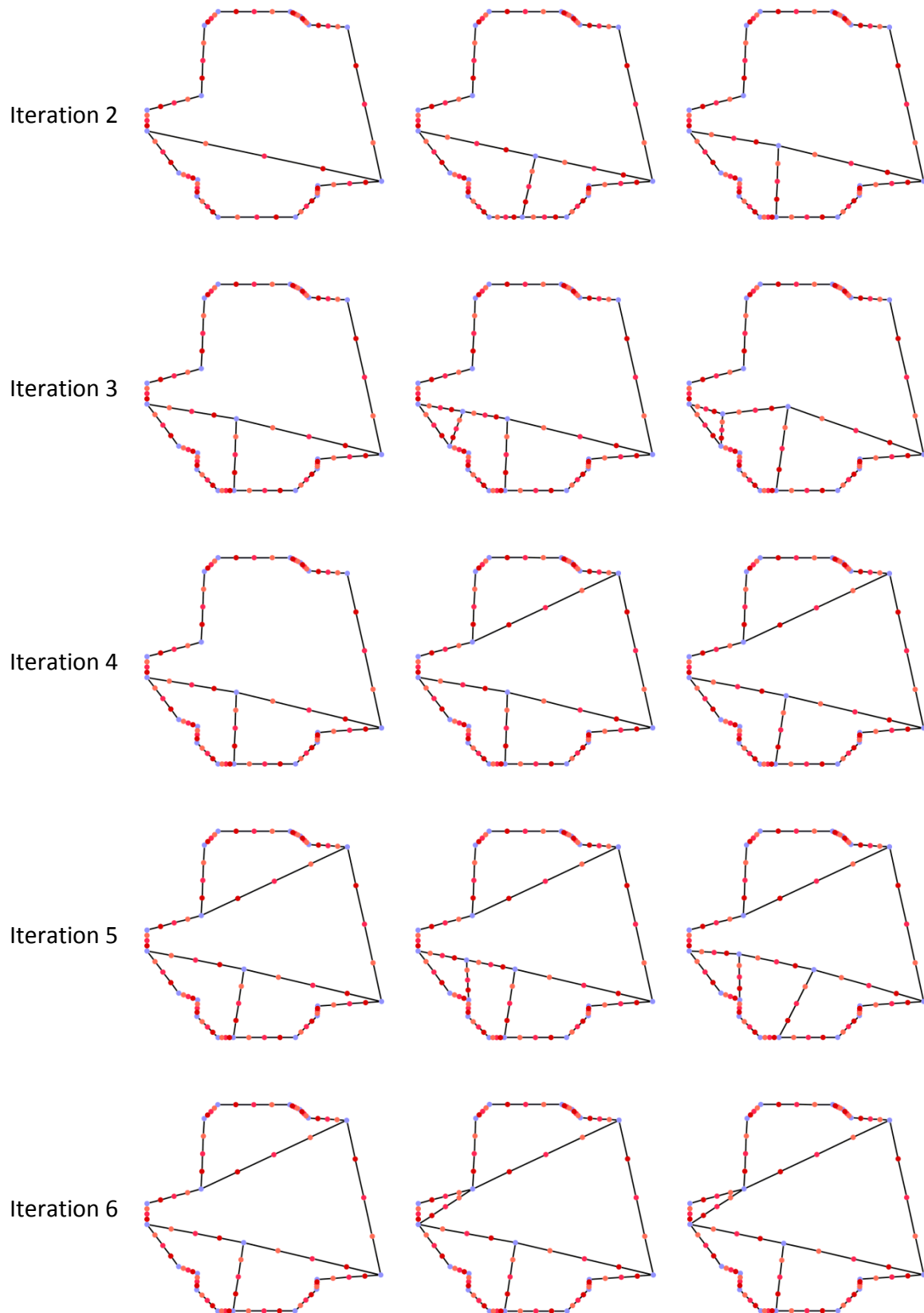


Abbildung II.1.4.29: Anwendungsbeispiel 3a - Iteration 1 - 6

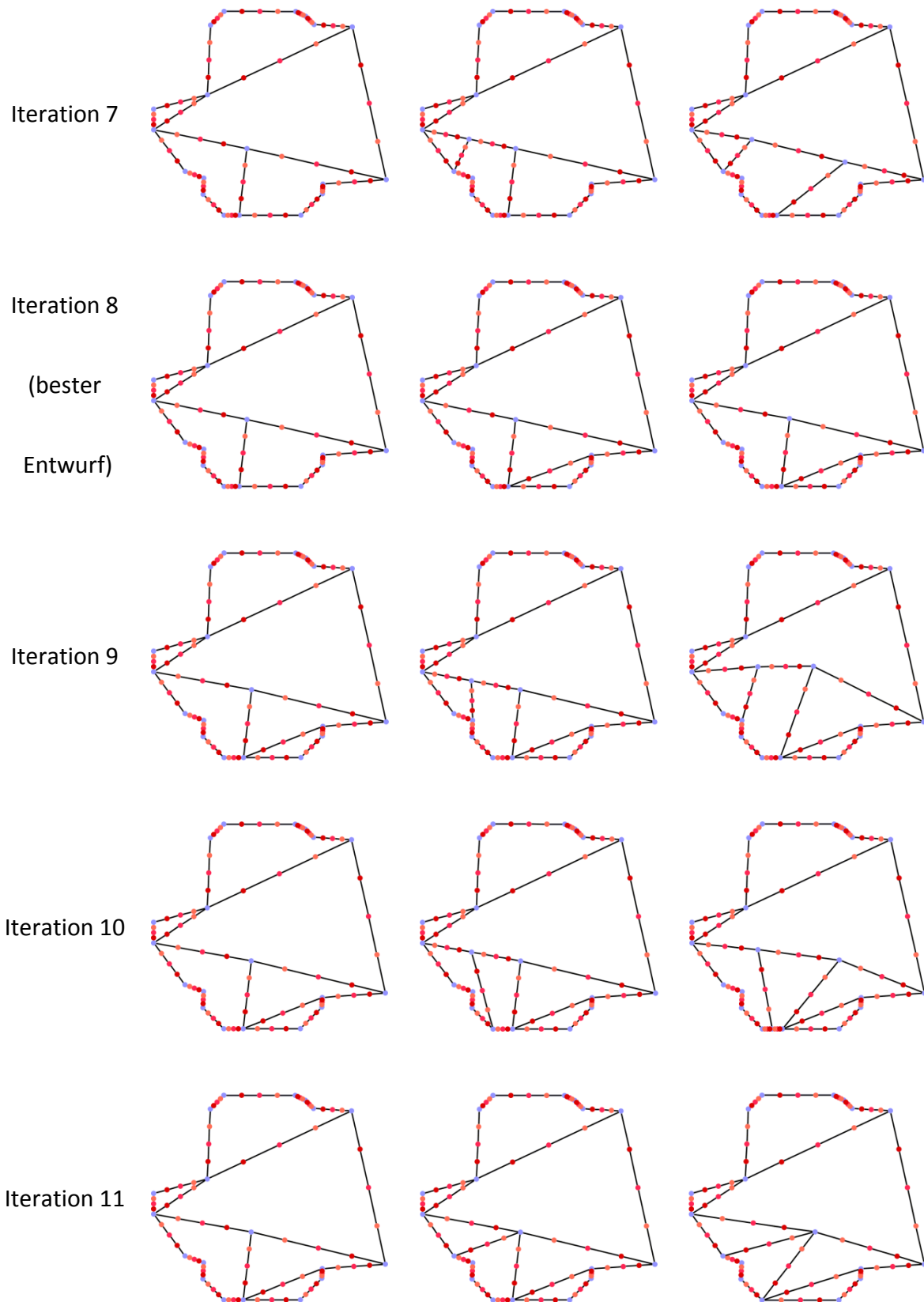


Abbildung II.1.4.30: Anwendungsbeispiel 3a - Iteration 6 – 11

	Heuristiken	Masse [kg]	Überlebens-raum [mm]	Energie-aufnahme [kJ]	Wanddicke [mm]
Referenz	-	14,552	471,8	25,46	2,00 - 2,75
Start	-	17,403	479,51	25,24	6,00
Iteration 1	UDS + SWT	15,607	476,9	23,88	4,09
Iteration 2	SFDW + SWT	13,146	475,0	24,31	3,21
Iteration 3	SFDW + SWT	13,898	478,8	25,48	3,25
Iteration 4	UDS + SWT	13,044	472,2	25,25	2,78
Iteration 5	SFDW + SWT	13,603	477,4	26,19	2,78
Iteration 6	UDS + SWT	13,016	472,1	26,00	2,64
Iteration 7	SFDW + SWT	13,610	472,0	26,41	2,63
Iteration 8	UDS + SWT	12,768	475,2	24,48	2,42
Iteration 9	SFDW + SWT	13,221	474,4	26,69	2,35
Iteration 10	BED + SWT	13,424	473,4	26,88	2,37
Iteration 11	UDS + SWT	13,149	474,0	26,31	2,28

Tabelle II.1.4.j: Anwendungsbeispiel 3a - Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse

Das Deformationsverhalten des Optimums ist dem Start- und dem Referenzentwurf in Abbildung II.1.4.31 gegenübergestellt. Hierbei wird ein Schnitt durch den Schweller normal zur x-Achse des globalen Fahrzeugkoordinatensystems (siehe Abbildung II.1.4.25) bei $x=1300$ (Aufprallposition des Pfahls) betrachtet. Während der hohle Profilquerschnitt des Startentwurfs vollständig zusammengedrückt wird und die Unterseite der Struktur stark ausbeult, besitzt zumindest der linke Teil des Referenzentwurfs durch seine Verstärkungen eine höhere strukturelle Integrität. Das Ergebnis der Optimierungsprozedur weist ein feines Faltenmuster auf, bei welchem mehrere Wände zueinander in Kontakt kommen und sich aneinander abstützen.

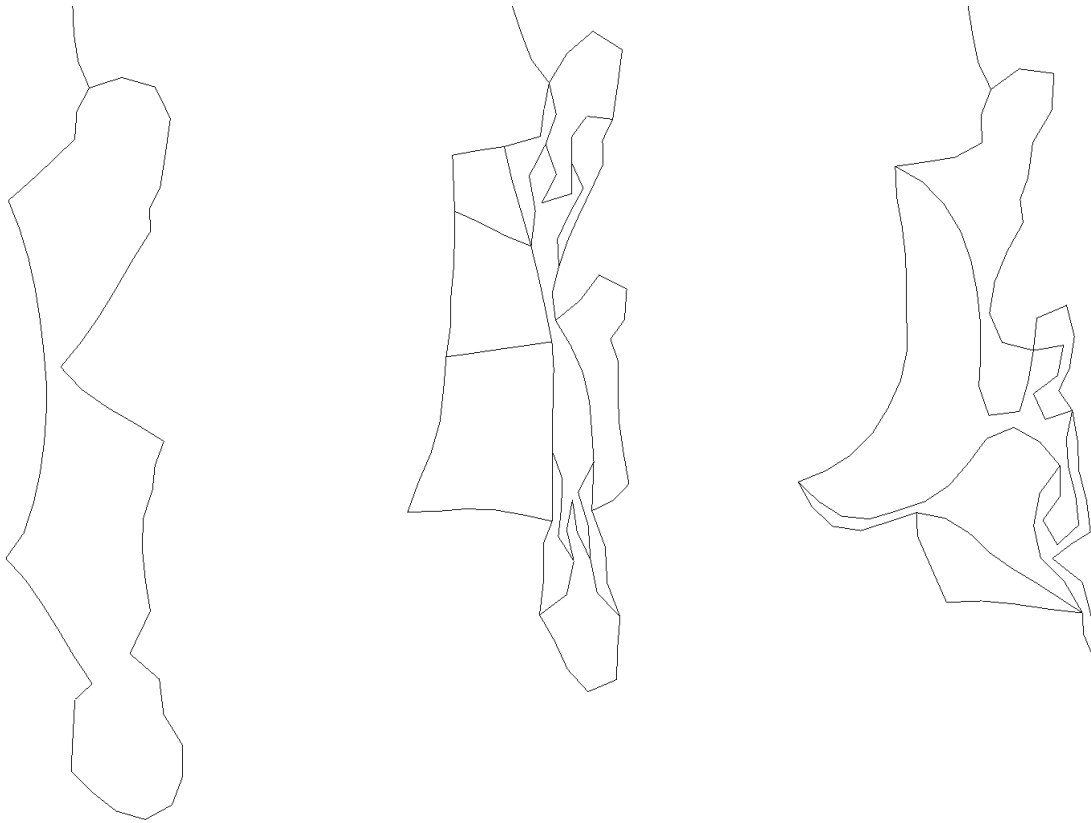


Abbildung II.1.4.31: Anwendungsbeispiel 3a - Startentwurf (li.), Referenzentwurf (mi.) und Optimum (re.) zum Zeitpunkt der maximalen Deformation als x-Schnitt durch $x=1300$

Anwendungsbeispiel 3b

In der zweiten Optimierungsprozedur dieses Anwendungsbeispiels wird prinzipiell die gleiche Formulierung des Optimierungsproblems verwendet wie in Anwendungsbeispiel 3a, allerdings mit dem Ziel ein ähnliches Ergebnis mit wesentlich weniger Funktionsaufrufen zu erreichen. Hierfür wird die Optimierungsprozedur in zwei Phasen aufgeteilt. In der ersten Phase findet eine *Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung* statt, in welcher allerdings in den inneren Optimierungsschleifen keine Gestaltoptimierungen und Dimensionierungen durchgeführt werden. In jeder Iteration findet also nur ein einziger Funktionsaufruf statt und die Gestalt der Struktur wird daher nur durch die Heuristiken verändert. Hierfür werden Optimierungsziel und Restriktion vertauscht, die Masse der Struktur bleibt also unverändert, während der Überlebensraum der Insassen maximiert werden soll. In der zweiten Phase wird für das Ergebnis der ersten Phase eine Dimensionierung durchgeführt mit dem Ziel die Masse

zu minimieren unter Berücksichtigung der Wahrung eines vorgegebenen Überlebensraums. In der zweiten Phase wird nur die Wanddicke des Schwellers als Entwurfsvariable verwendet, daher ist auch hier nur eine geringe Anzahl von Funktionsaufrufen notwendig.

Als Startentwurf wird ein hohler Profilquerschnitt (siehe Abbildung II.1.4.32) mit einer Wanddicke von 5,02 mm verwendet, dessen Masse identisch mit der des Referenzentwurfs ist.

Die Entwicklung der Struktur im Laufe der ersten Phase der Optimierung ist in Abbildung II.1.4.32 bis Abbildung II.1.4.34 dargestellt. Der linke Teil der Abbildungen zeigt den Startentwurf und der rechte Teil das Ergebnis der jeweiligen Iteration. Die Optimierungsergebnisse sind in Tabelle II.1.4.k aufgelistet.

In der neunten Iteration wird der beste Entwurf gefunden, welcher den Überlebensraum verglichen mit dem Startentwurf um 11,23 % und gegenüber dem Referenzentwurf um 4,54 % vergrößern kann. Da die nachfolgenden Iterationen keine Verbesserung der Struktur hinsichtlich der Zielfunktion mehr erwirken können, endet die Optimierung nach der 13. Iteration. Wie in Anwendungsbeispiel 3a sind die Heuristiken *Ausnutzen des Deformationsraums* und *Abstützen sich schnell deformierender Wände* für alle Topologiemodifikationen verantwortlich, die eine Verbesserung der Zielfunktion in der jeweiligen Iteration zur Folge haben.

Die erste Phase der Optimierungsprozedur ist nach 13 Funktionsaufrufen abgeschlossen.

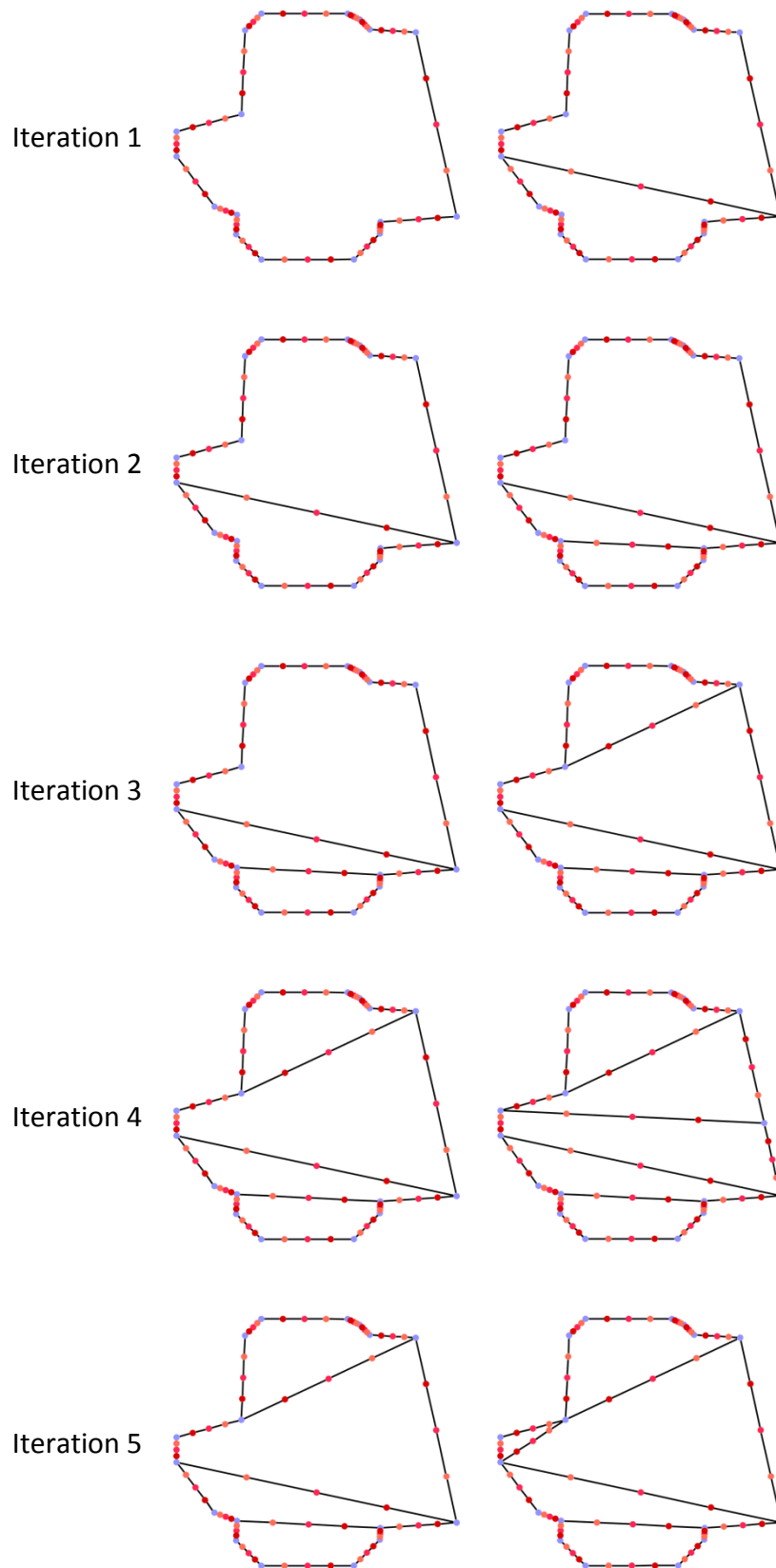


Abbildung II.1.4.32: Anwendungsbeispiel 3b - Iteration 1 - 5

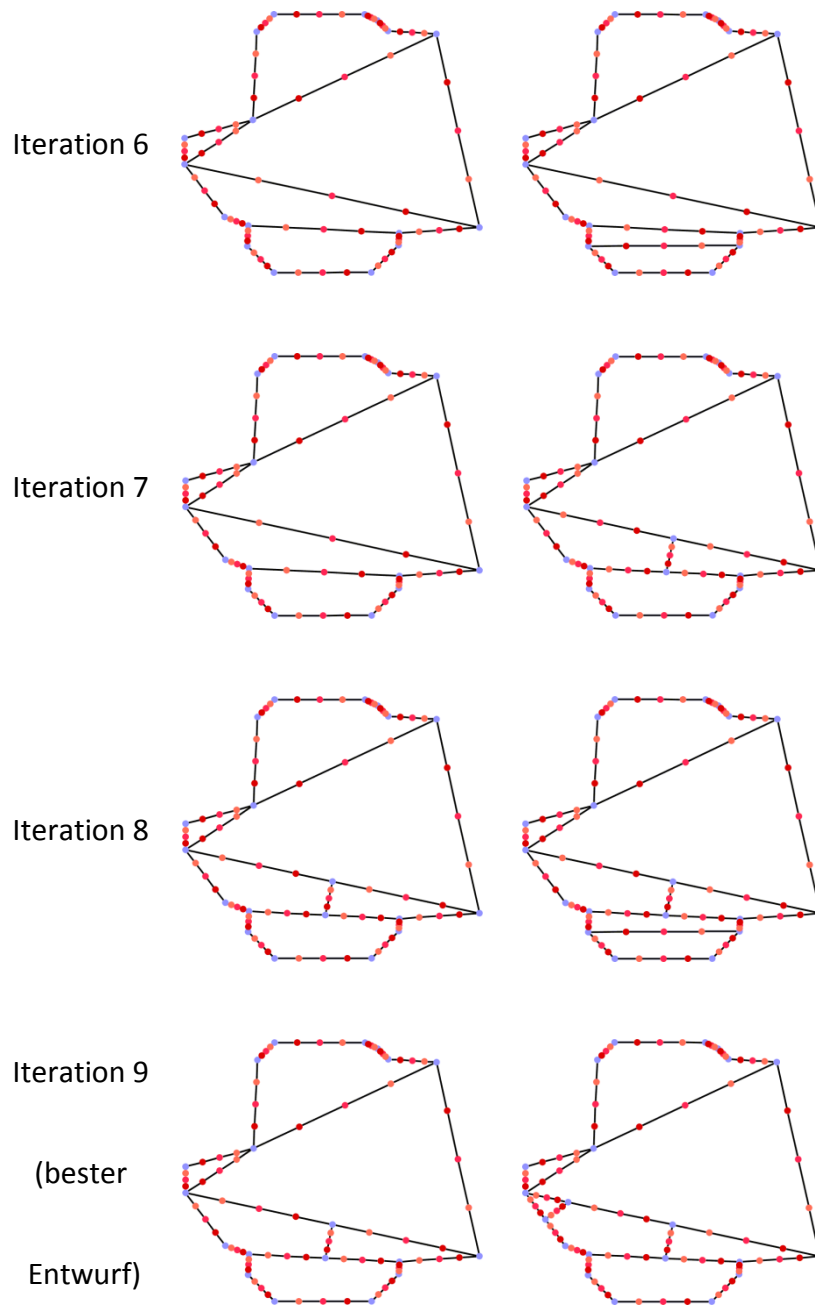


Abbildung II.1.4.33: Anwendungsbeispiel 3b - Iteration 6 – 9

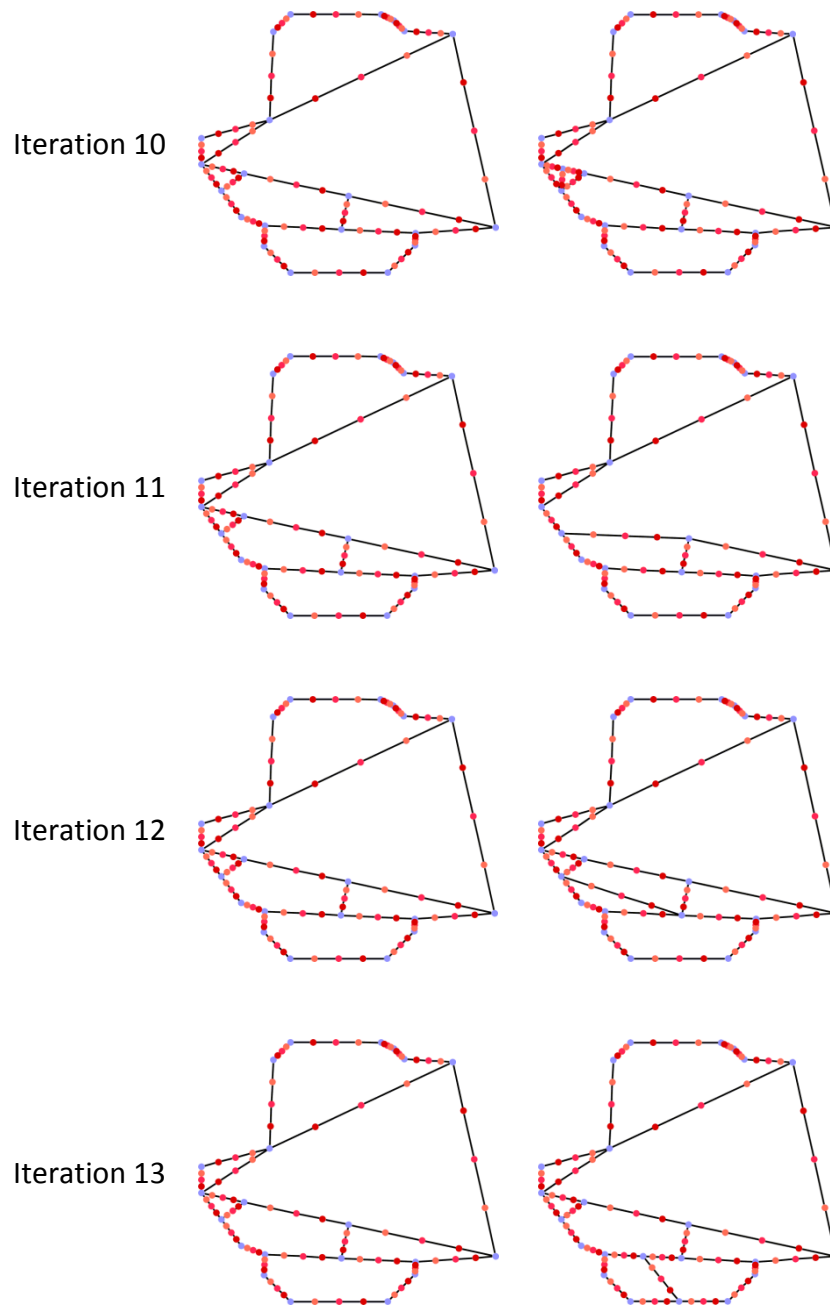


Abbildung II.1.4.34: Anwendungsbeispiel 3b - Iteration 10 - 13

	Heuristiken	Überlebensraum [mm]	Masse [kg]	Energieaufnahme [kJ]	Wanddicke [mm]
Referenz	-	471,8	14,552	25,46	2,00 - 2,75
Start	-	443,4	14,552	24,91	5,02
Iteration 1	UDS + SWT	464,0	14,552	24,03	3,81
Iteration 2	UDS + SWT	469,3	14,552	23,72	3,40
Iteration 3	UDS + SWT	471,1	14,552	24,72	2,98
Iteration 4	SFDW + SWT	465,5	14,552	24,72	2,54
Iteration 5	UDS + SWT	474,3	14,552	26,00	2,83
Iteration 6	UDS + SWT	468,6	14,552	26,17	2,60
Iteration 7	SFDW + SWT	487,1	14,552	26,37	2,78
Iteration 8	UDS + SWT	482,0	14,552	26,46	2,55
Iteration 9	SFDW + SWT	493,2	14,552	26,45	2,73
Iteration 10	SFDW + SWT	490,1	14,552	26,45	2,70
Iteration 11	RSC + SWT	486,3	14,552	26,57	2,81
Iteration 12	UDS + SWT	485,5	14,552	26,56	2,55
Iteration 13	BED + SWT	492,6	14,552	26,54	2,64

Tabelle II.1.4.k: Anwendungsbeispiel 3b - Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse in Phase 1

Das Ergebnis der neunten Iteration wird nun für eine nachfolgende Dimensionierung verwendet, bei welcher die Wanddicke des Schwellers als Entwurfsvariable benutzt wird. Der in der ersten Phase der Optimierungsprozedur aufgebaute Überschuss an Überlebensraum wird nun wieder abgebaut, indem die Masse der Struktur als zu minimierende Zielfunktion festgelegt wird, während der Überlebensraum als Restriktion verwendet wird und mindestens dem des Referenzentwurfs entsprechen muss. Für die Optimierungsprozedur wird ein Optimierungsverfahren angewendet, welches sequenziell den Entwurfsraum reduziert und die Optimierungsfunktionale durch lineare Polynome approximiert, wobei die Entwurfspunkte hierfür nach einem *D-optimalen Versuchsplan* ausgewählt werden. Das Optimierungsergebnis ist in Tabelle II.1.4.l zusammengefasst. Nach 21 weiteren Funktionsaufrufen und damit insgesamt 34 Funktionsaufrufen ist das Ergebnis der beiden Phasen dieser Optimierungsprozedur nur um 2,24 % schwerer als das Ergebnis aus Anwendungsbeispiel 3a, in welchem 3220 Funktionsaufrufe verwendet wurden. Die Verringerung der Masse gegenüber dem Referenzentwurf beträgt 10,29 %.

	Masse [kg]	Überlebensraum [mm]	Energieaufnahme [kJ]	Wanddicke [mm]
Referenz	14,552	471,8	25,46	2,00 - 2,75
Start Phase 1	14,552	443,4	24,91	5,02
Start Phase 2	14,552	493,2	26,45	2,73
Optimum	13,054	473,8	26,43	2,45

Tabelle II.1.4.I: Anwendungsbeispiel 3b - Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse in Phase 1

Das Deformationsverhalten der Ergebnisse der Anwendungsbeispiele 3a und 3b wird in Abbildung II.1.4.35 miteinander verglichen unter Verwendung eines x-Schnitts durch die Aufprallposition des Pfahls ($x=1300$). Das Ergebnis des Anwendungsbeispiels 3b weist bei einer ähnlichen Masse eine geringere strukturelle Integrität auf. Der Schweller erfährt lokal höhere Deformationen und die Unterseite der Struktur beult nach unten aus.

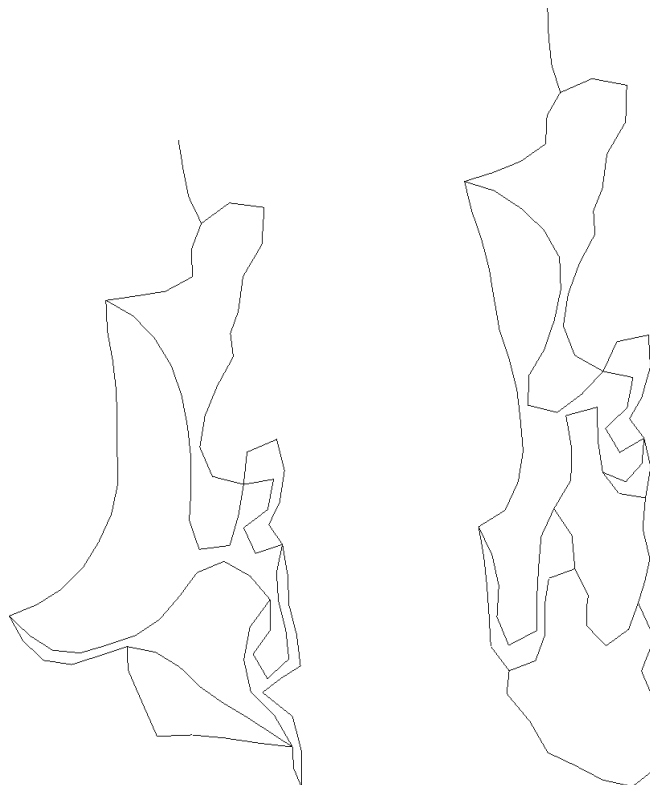


Abbildung II.1.4.35: Vergleich des Deformationsverhaltens zwischen den Ergebnissen aus Anwendungsbeispiel 3a (links) und 3b (rechts) als x-Schnitt durch $x=1300$

II.1.5 Wissenschaftlich - technische Ergebnisse – SFE (2. Teil)

Die Optimierung aus GRAMB liefert Designraum, Designgrenzen und Designvariablen. Diese Größen können automatisiert in das SFE CONCEPT Modell übertragen werden. Somit stehen diese Größen für eine weitere Formoptimierung zur Verfügung.

Im Folgenden wird die Formoptimierung im Kontext des Gesamtfahrzeuges und der damit verbundene Übergang auf 3D-Strukturen betrachtet.

Aus der erkannten Grundtopologie wird ein 3-dimensionales SFE CONCEPT Modell und daraus ein rechenfertiges 3-D Finite Element Modell (FEM) abgeleitet.

Das SFE CONCEPT Modell ist parametrisch aufgebaut und damit für die Anforderungen für die spätere Formoptimierung und die Gesamtvalidierung vorbereitet.

Aus Abbildung II.1.5.1 ist zu erkennen, dass ein reales Bauteil - obwohl aus einem Strangpressprofil gefertigt - keinen gleichbleibenden Querschnitt hat. Vielmehr sind lokale Aussparungen, Versteifungen, usw. vorhanden.

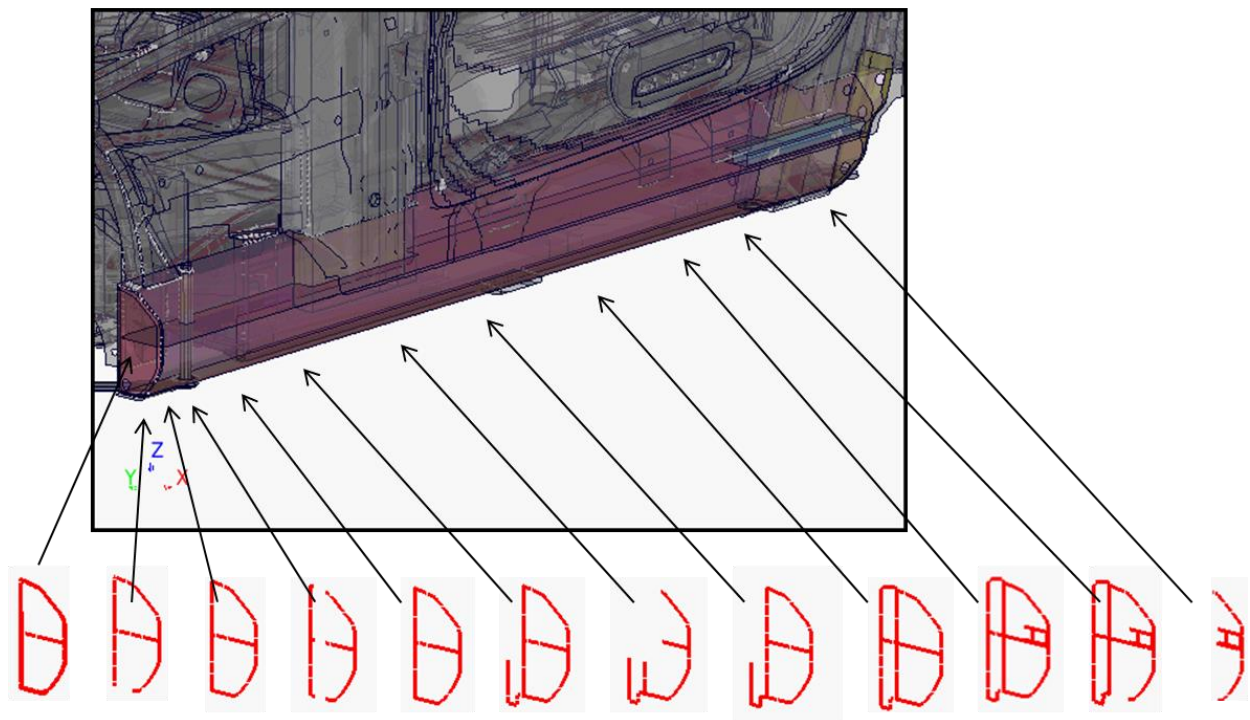


Abbildung II.1.5.1: Schnitte durch Strangpress-Schweller-Profil

Die vorgestellte Musterüberlagerung kann auch hier verwendet werden, um die einzelnen, abschnittsweise konstanten Querschnitte aus einem einfachen Katalog mit vorbereiteten Mustern zu erzeugen. In Abbildung II.1.5.2 ist die Überlagerung für einen Querschnittsabschnitt dargestellt.

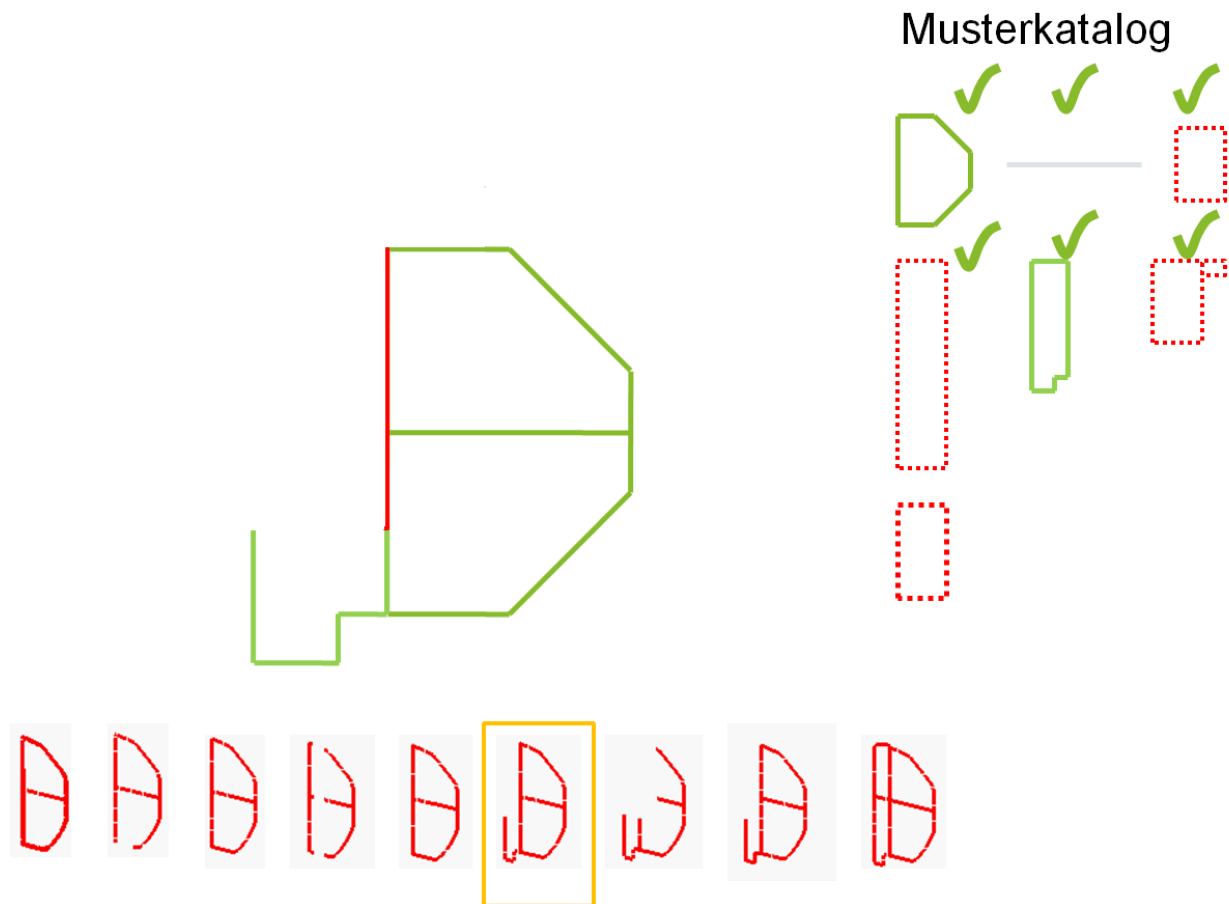


Abbildung II.1.5.2: Querschnittserzeugung durch Musterüberlagerung

In dem für das Crash-Topo-Projekt von der Daimler AG zur Verfügung gestellte Modell (Abbildung II.1.5.3) werden nun die möglichen Variationen im 3D-Gesamtmodell aufgezeigt.

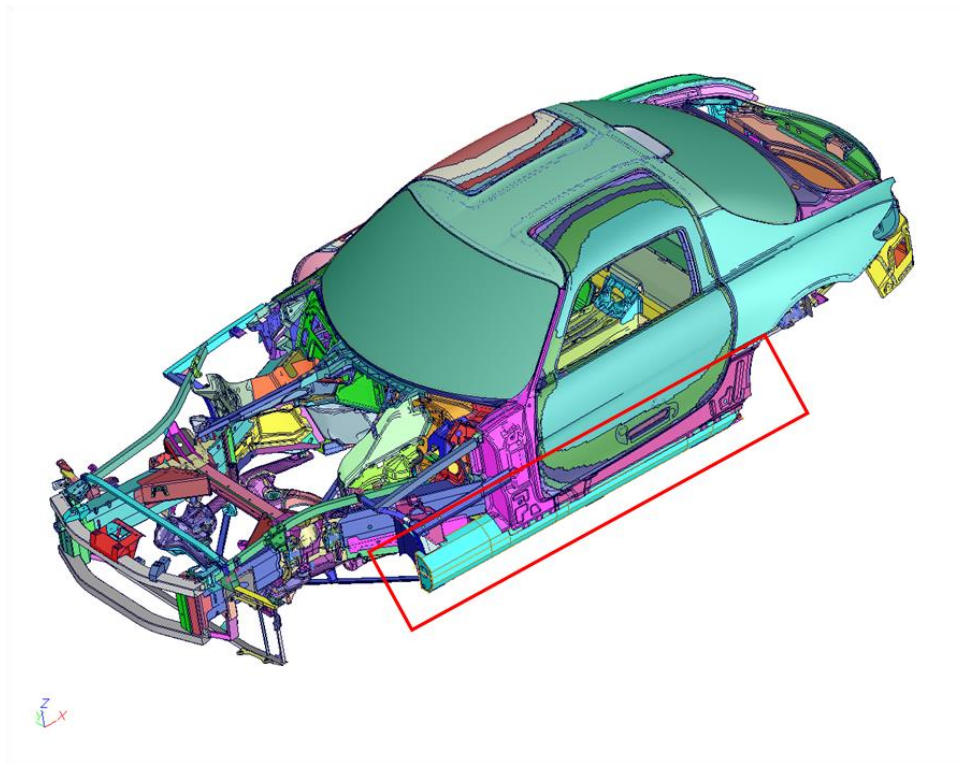


Abbildung II.1.5.3: Daimler-Modell - Parametrisches SFE CONCEPT Modell für den Schweller

Abbildung II.1.5.4 zeigt mögliche Variationen mittels des zuvor beschriebenen Zellen-Musterkatalogs.

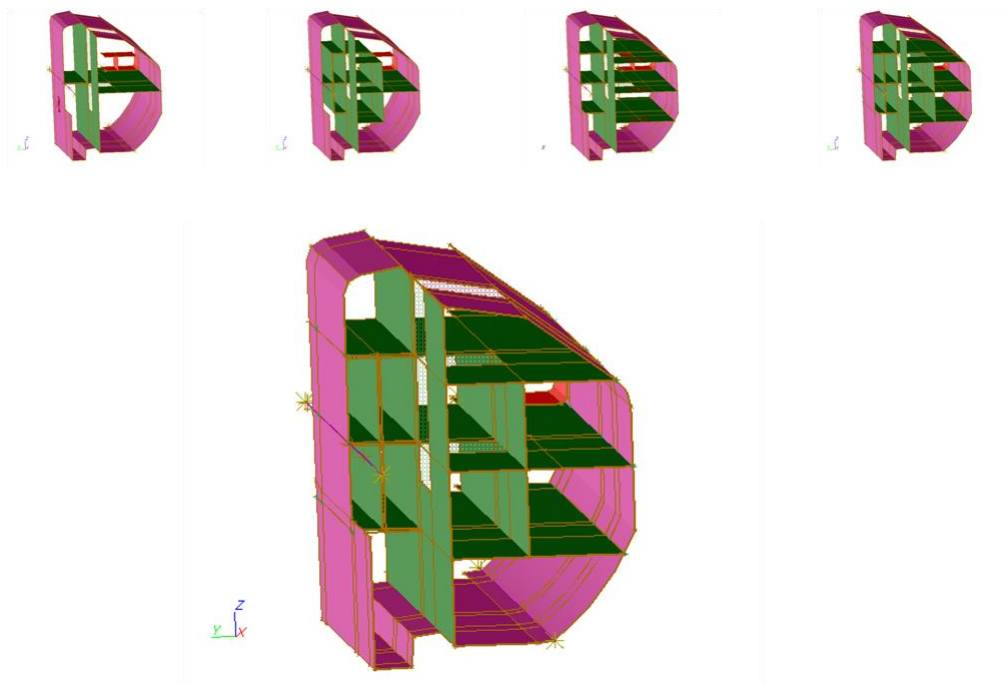


Abbildung II.1.5.4: Musterüberlagerung im Schweller

Die in dem realen Schweller-Profil beobachteten lokalen Änderungen wurden entsprechend in ein vereinfachtes, die Charakteristik des Pfahlaufpralls widerspiegelndes Testmodell übertragen. Die Änderungen sind in Abbildung II.1.5.5 zu sehen.

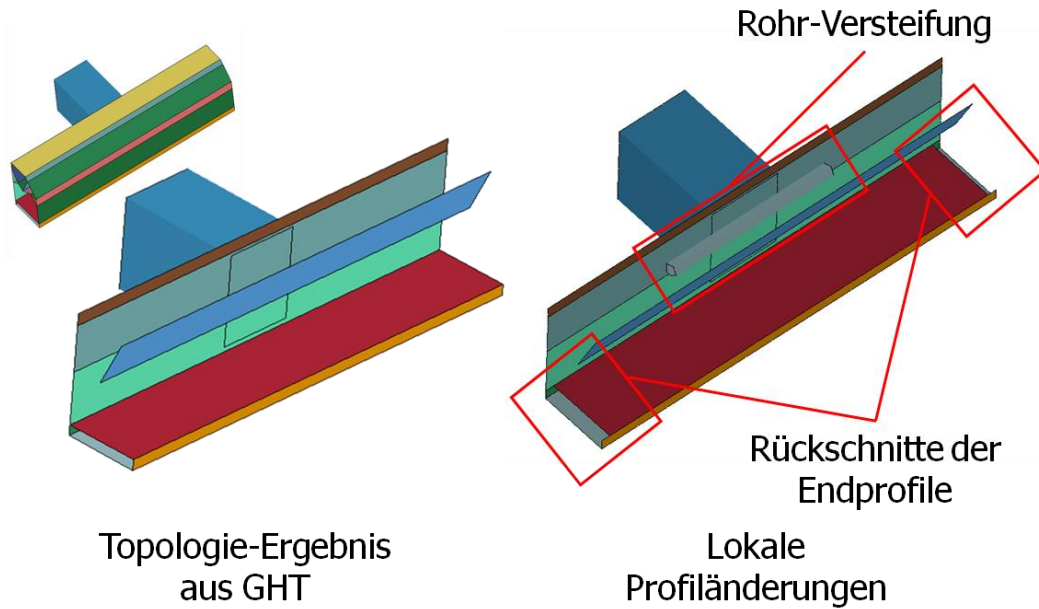


Abbildung II.1.5.5: Lokale Änderungen im Testmodell

Durch die Änderungen ergibt sich dieser Kraftverlauf (Abbildung II.1.5.6):

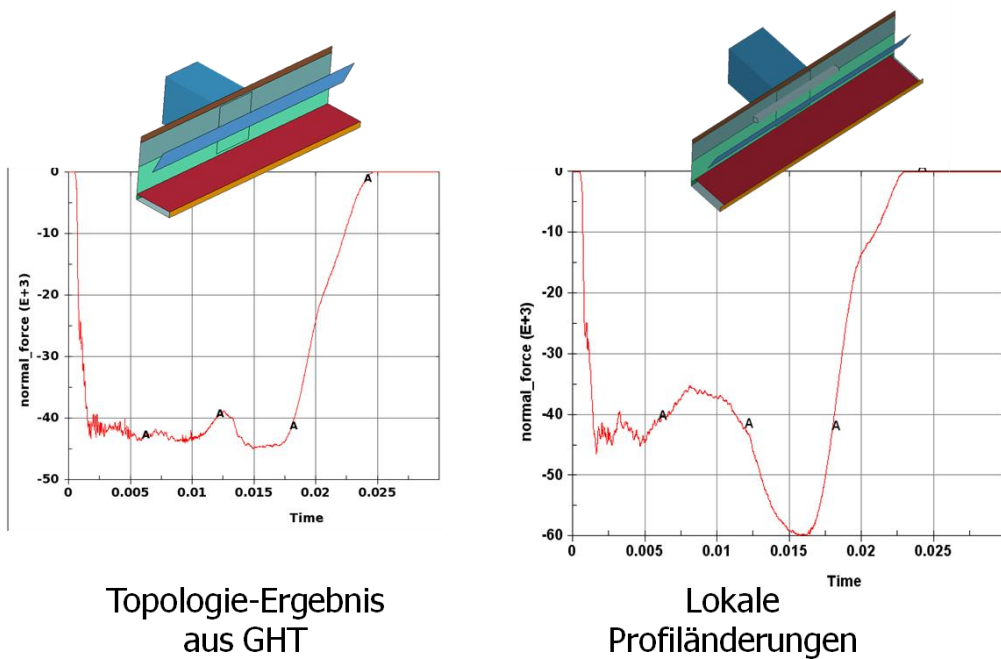


Abbildung II.1.5.6: Kraftverlauf bei lokalen Änderungen im Prozesskettenmodell

Durch eine Formoptimierung mit dem parametrischen Modell und LS-OPT soll der Kraftverlauf wieder verbessert werden. Die Optimierung hat folgende Parameter:

- Genetischer Alg.: Population 28, Iterationen 40
- 9 Formvariablen: 6 Punktkoordinaten im Querschnitt, 1 Länge Rohr, 2 Länge Steg-Rückschnitte
- 2 Dicken
- Lastfälle für Pole-Crash, Biegung, Torsion
- Zielfunktion: Masse
- Nebenbedingungen: Max. Normalkraft, Intrusion, Verschiebungen bei Biegung/Torsion

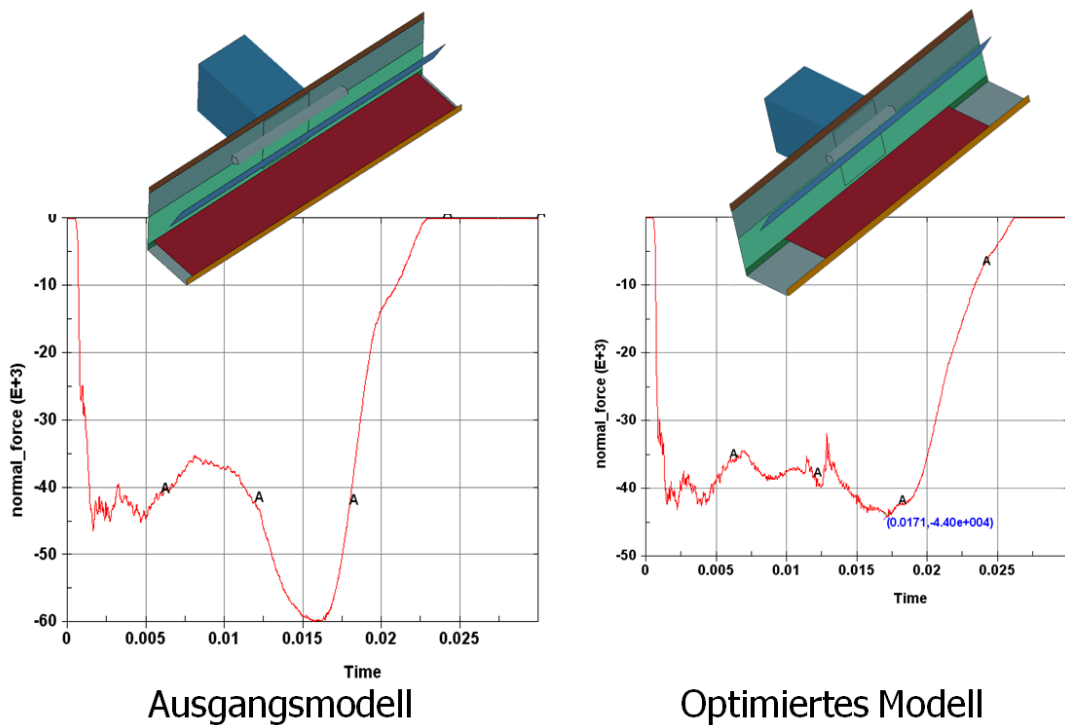


Abbildung II.1.5.7: Kraftverlauf nach der Optimierung

Abbildung II.1.5.7 zeigt, der zunächst ungleichmäßige Kraftverlauf konnte durch die Form-Optimierung geglättet werden.

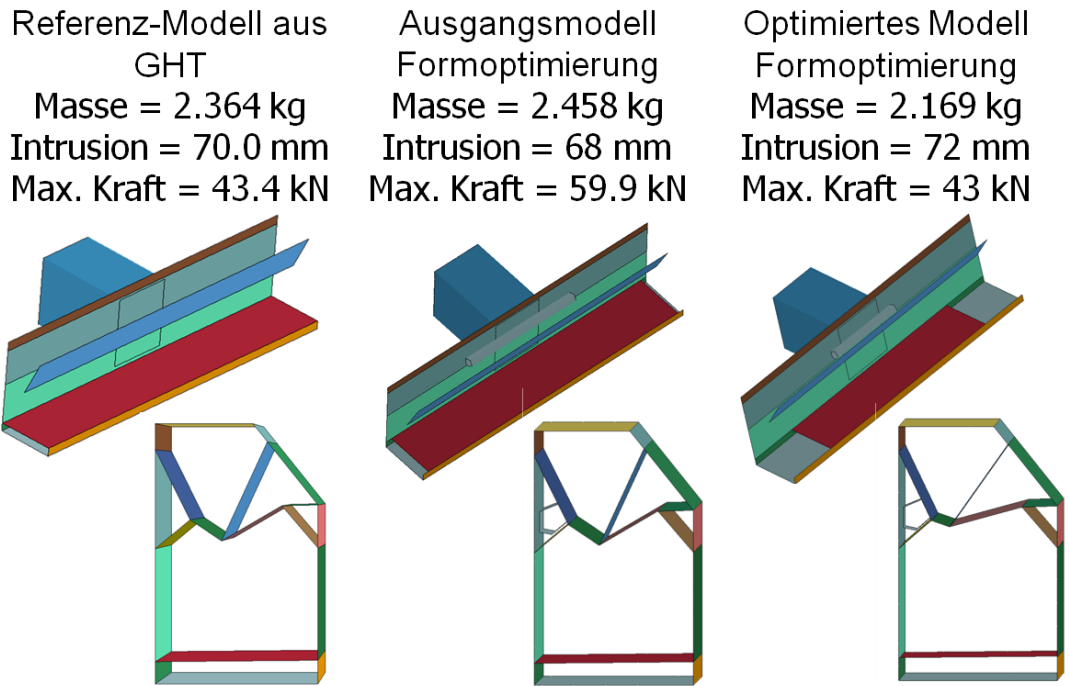


Abbildung II.1.5.8: Modell-Vergleich

Der Modell-Vergleich in Abbildung II.1.5.8 zeigt, dass die lokalen Änderungen mit den geeigneten – durch die Formoptimierung gefundenen – Abmessungen nun einen sehr positiven Effekt auf die Eigenschaften des Modells haben. Die lokalen Änderungen müssen der aktuellen Situation im 3D-Modell unbedingt angepasst werden.

Um die Effekte der Formoptimierung noch realistischer zu bewerten, wurde das Modell zu einem „echten“ 3D-Lastfall erweitert, wie in Abbildung II.1.5.9 zu sehen.

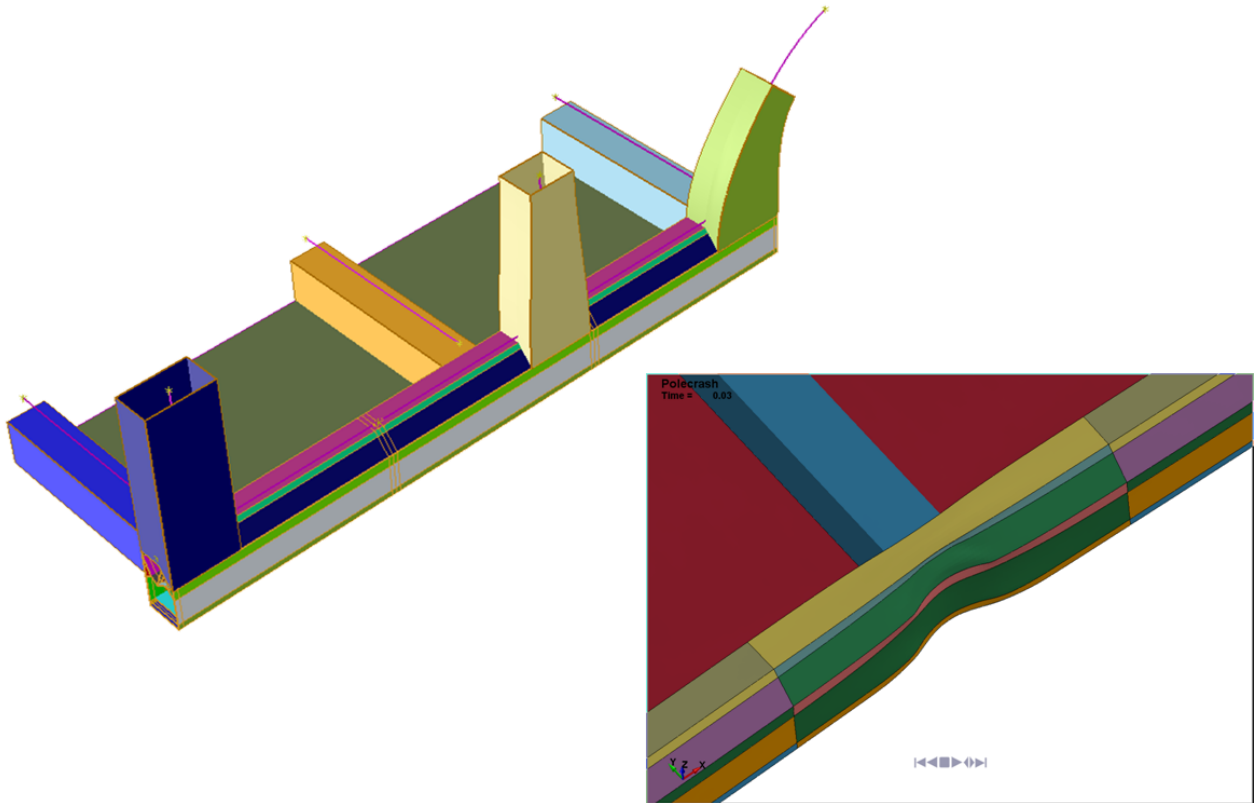


Abbildung II.1.5.9: Erweiterung Testmodell mit Anbindungsteilen

Dieses Modell wurde ebenfalls mit LS-OPT mit diesen Parametern Form-optimiert:

- Genetischer Alg.: Population 28, Iterationen 20
- 7 Formvariablen: 6 Punktkoordinaten im Querschnitt, 1 Länge Rohr
- 2 Dicken
- Lastfall für Pole-Crash
- Zielfunktion: Max. Normalkraft
- Nebenbedingungen: Masse, Intrusion

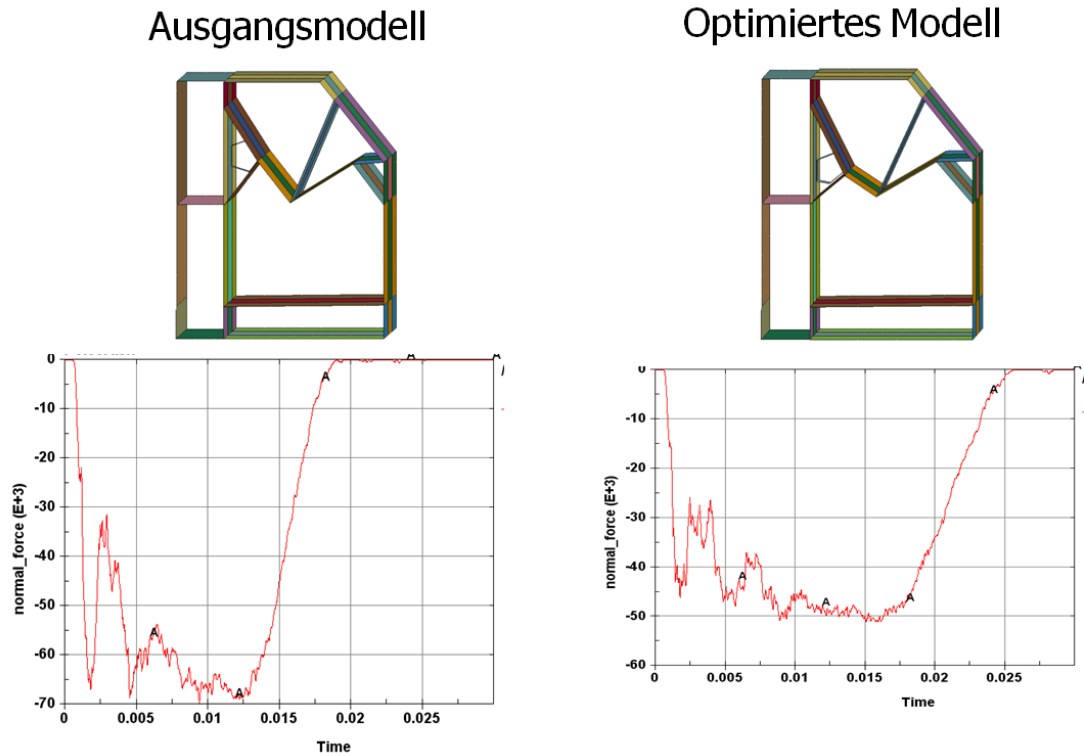


Abbildung II.1.5.10: Optimierungs-Ergebnis

Wie in Abbildung II.1.5.10 zu sehen, konnte der durch die Erweiterung veränderte Kraftverlauf wiederum durch die Form-Optimierung deutlich gesenkt und geglättet werden.

Das verstärkt das zuvor beobachtete Verhalten, dass die Form immer der aktuellen Situation im 3D-Modell angepasst werden muss.

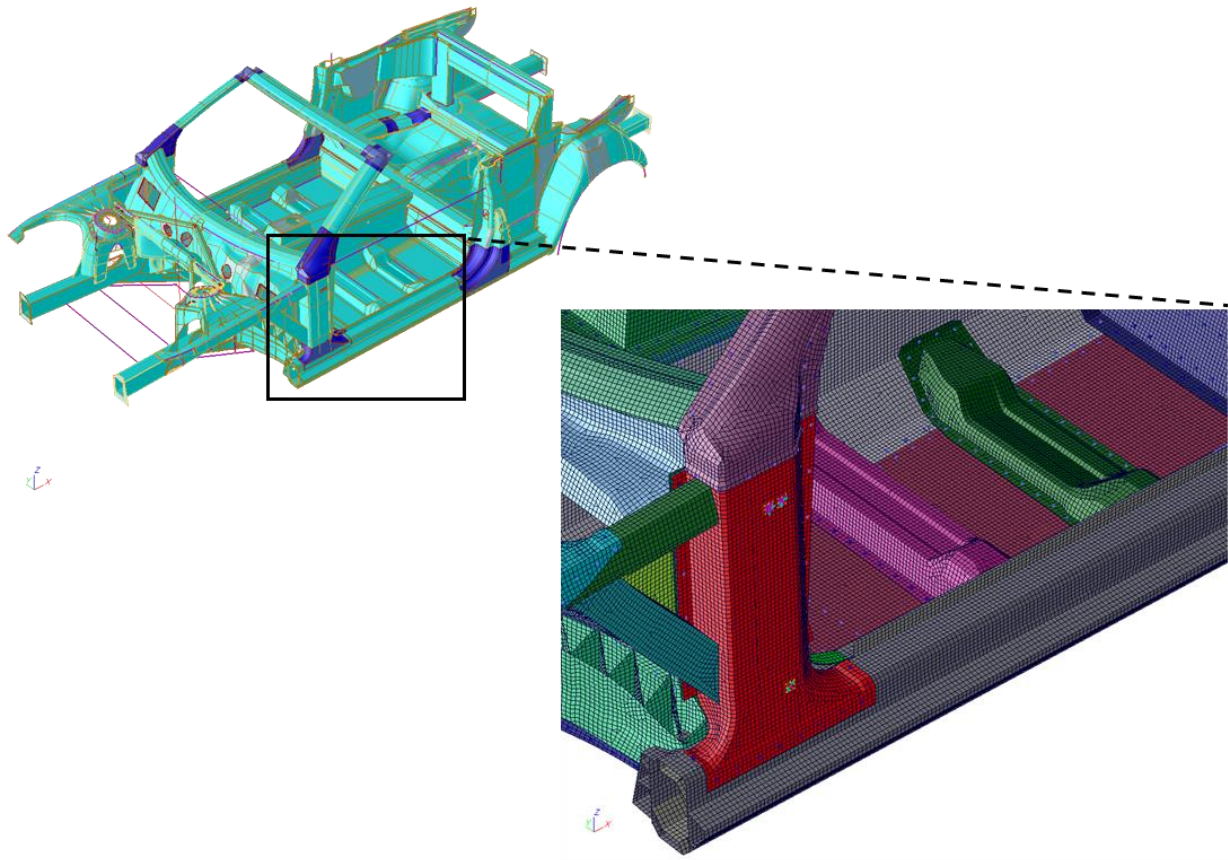
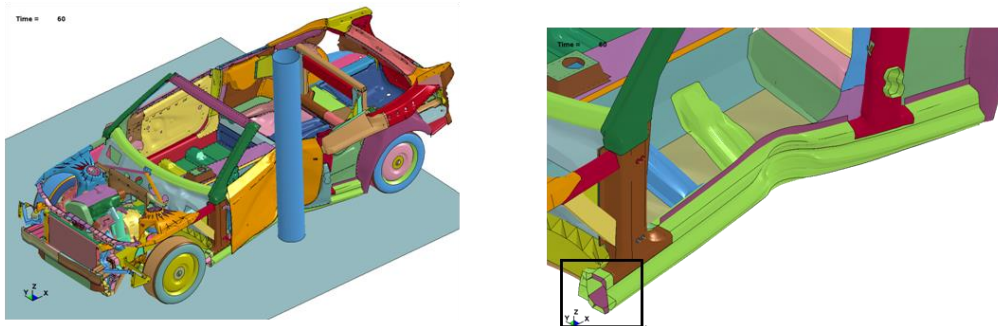


Abbildung II.1.5.11: VW-Osnabrück-Modell - vollständige Karosseriegeometrie in SFE CONCEPT

Aus der Vorlage des für das Crash-Topo-Projekt von VW-Osnabrück zur Verfügung gestellte Modell wurde ein parametrisches SFE CONCEPT Modell aufgebaut. Abbildung II.1.5.11 zeigt das SFE CONCEPT Modell und einen Ausschnitt des mit dem integrierten Vernetzer erzeugten FE-Modells.

SFE CONCEPT Modelle sind parametrisch in Topologie und Geometrie. Vielfältige Variationen der Topologie sind möglich durch Muster-Überlagerung oder Prägungen/Löcher oder durch Austausch/Kombination von ganzen Bauteilen.

Abbildung II.1.5.12 zeigt beispielhaft einige Schweller-Topologien. Auch nach beliebigen Änderungen der Topologie und/oder Geometrie kann stets ein rechenfertiges FE-Modell generiert werden, so dass eine sofortige Bewertung oder Parameter-Optimierung möglich ist.



Variation / Optimierung von
Topologie und/oder Geometrie

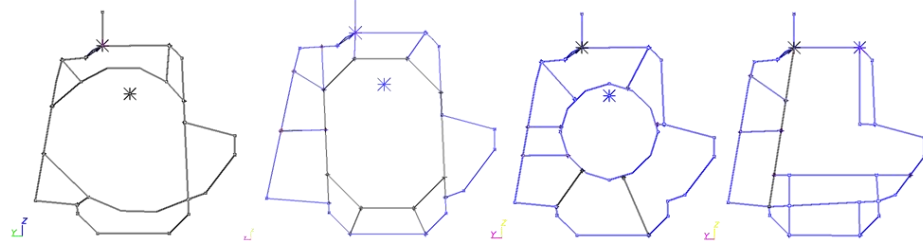


Abbildung II.1.5.12: Automatische Generierung des Simulationsmodells für beliebige Topologie / Geometrie

II.2 Nachweis

II.2.1 Nachweis asc(s)

Verwendungsnachweis von Personalkosten:

Für die Einarbeitung und Vorgabe der Zielrichtung, Eingrenzung des Problembereichs, Einbringen von fahrzeugspezifischem Know-How und der Bereitstellung digitaler Prototypen wurden 3,5 AM eingesetzt. Hinzu kommt die Definition der Anforderungen mit 3 AM. Hierzu zählen Arbeiten zum Erstellen und Auswerten des Fragenkatalogs, der Definition der Lastfälle, Material, Bauweisen, Füge- und Fertigungstechnologien. Die Arbeiten im Zusammenhang mit der Mustererkennung und -identifizierung für den Musterkatalog in SFE CONCEPT erstreckten sich auf 2,5 AM. Die Untersuchungen zur Ableitung, Aufbereitung und Verwendung von Substrukturen, sowie die Abgrenzung von Bau- und Designraum isolierter Teilbereiche erfolgte im Zeitraum von 8 AM. Die daraus abgeleiteten Demonstratoren und Validierungsbeispiele wurden in der Umgebung des HLRS getestet. Sich ergebende Problemstellungen bei den Optimierungsläufen wurden in Zusammenarbeit mit dem HLRS gelöst und nachhaltige Strukturen geschaffen (5 AM). Für die gesamte Projektkoordination und -dokumentation, sowie die kritische Wertung und Überprüfung der Zielerreichung wurden 4 AM eingesetzt. Für verwaltungstechnische Arbeiten sind 2 AM angefallen. Weitere Beschäftigungsentgelte sind nicht angefallen.

Verwendungsnachweis Reisekosten

Die angefallenen Reisekosten gehen auf regelmäßige Projekttreffen und Workshops mit den Projektpartnern, assoziierten Partnern und dem Projektträger DLR zurück. Hinzu kommen Reisekosten für projektbezogene Schulungen und öffentlichkeitswirksame Arbeit auf Tagungen und Messen.

Verwendungsnachweis vorhabenspezifische Anschaffungen / sonstige Vorhabenkosten

Für das Pre- und Postprocessing des Projektes war die Anschaffung einer leistungsfähigen Workstation notwendig. Weitere Kosten setzen sich aus weiterer projektbezogener IT-Infrastruktur und deren projektbezogenen Wartung sowie Problem- und Fehlerbehebung zusammen. Zudem entstanden Post- und Fernmeldegebühren, Kosten für die Erstellung von

Geheimhaltungsvereinbarungen, Durchführung von Veranstaltungen / Projektmeetings und Werbematerial.

II.2.2 Nachweis SFE

Verwendungsnachweis von Personalkosten:

Für die Entwicklung (inklusive Anwendungs-Test) der Musterüberlagerung wurden 8 AM eingesetzt. Die Vorbereitung und Erstellung der Substrukturen wurde mit 4 AM unterstützt. Die Analyse und daraus abgeleitete Regeln für einen Musterkatalog unter Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen und Bedingungen aus verschiedenen Lastfällen wurde mit 5 AM durchgeführt. Für das Interface zwischen SFE CONCEPT und dem Ergebnis der Voroptimierung mittels ESLM und HCA wurden 4 AM in Anspruch genommen. Für den Aufbau der Grundtopologie (3D-Geometrie- und Schalenmodell) wurden 6 AM eingesetzt. Für die Kopplung von GRAMB und SFE CONCEPT mit Interfaces in beiden Richtungen wurden 4 AM aufgewendet.

Für die Anpassung der bisherigen Gestaltoptimierungstools und die Durchführung der Gestaltoptimierung am Gesamtfahrzeugmodell mit LS-OPT wurden 8 AM eingesetzt. Für die Erstellung und Durchführung des Demonstrator-Prozesses zur Gesamtvalidierung des Konzepts – Voroptimierung (ESLM, HCA) – Topologieoptimierung (GHT) – Gestaltoptimierung (SFE CONCEPT) – wurden 4 AM eingesetzt. Die Dokumentation und Bewertung der Arbeiten und Ergebnisse wurde in 1 AM durchgeführt. Aufwendungen für interne und projektpartnerübergreifende Projekttreffen und Unterstützung, sowie die Projektkoordination sind ebenfalls in den o.g. Zahlen enthalten.

Verwendungsnachweis Reisekosten

Die angefallenen Reisekosten gehen auf regelmäßige Projekttreffen und Workshops mit den Projektpartnern, assoziierten Partnern und dem Projektträger DLR zurück. Sowie auf Reisekosten für projektbezogene Schulungen und öffentlichkeitswirksame Arbeit auf Tagungen.

Verwendungsnachweis vorhabenspezifische Anschaffungen

Für die Erfüllung der aus dem Projekt entstehenden Berechnungen war die Anschaffung einer leistungsfähigen Hardware notwendig.

Die höheren Kosten für die "Vorhabenspezifische Anlagen" erklären sich aus zwei Änderungen:

1. Änderung der Serverkonfiguration, um die Performance der Optimierungsläufe zu erhöhen

- schnellerer Prozessor (2,93 GHz statt 2,8 GHz)
- mehr Hauptspeicher (192 GB statt 96 GB)
- Trennung der Festplatten in System- und Datenplatte (8 x 1TB statt 4x500GB)

2. LTO-Backup-System für die anfallenden Simulationsdaten

II.2.3 Nachweis DYNAmore

Verwendungsnachweis von Personalkosten:

Für die Einarbeitung der Mitarbeiter anhand von Literaturstudien wurden die beantragten 0.5 AM eingesetzt. Zur Validierung der Crashmodelle (VW-Osnabrück und Daimler), sowie zur Vernetzung des Entwurfsraums mit Volumenelemente der Modelle zur Durchführung der Topologieoptimierungen war 1 AM erforderlich. Für die eingehende Untersuchung der Methoden anhand von Voroptimierungen, die Beurteilung beider Methoden, sowie zugehörige Grundlagenuntersuchungen wurden 9 AM eingesetzt. Zur Weiterentwicklung der Implementierung, bei der ESL-Methode insbesondere für das Schnittstelleninterface zwischen dem nichtlinear dynamischen LS-DYNA-Input und dem linear statischen Genesis/ESL-Input, bei der HCA-Methode insbesondere für Extrusionsnebenbedingungen bei beliebigen Aussparungen sowie die Verwendung von Pentaederelementen, für das Erstellen der notwendigen Skriptumgebung für die DYNAmore Rechnerumgebung, sowie für das Aufsetzen der Prozesse am HLRS wurden 9 AM benötigt. Die Optimierung des Demonstrator-Modells mit der HCA- und ESL-Methode sowie die Gesamtvalidierung umfasste 3 AM. Die Dokumentation der Ergebnisse wurde in 1 AM durchgeführt. Die Aufwendungen für interne und projektpartnerübergreifende Projekttreffen und die Projektkoordination sind in den oben genannten Zahlen enthalten.

Verwendungsnachweis Reisekosten

Reisekosten sind angefallen zu Projekttreffen und Workshops mit den Projektpartnern und den assoziierten Partnern. Des Weiteren sind Reisekosten für einen öffentlichkeitswirksamen Vortrag auf einer Fachkonferenz entstanden. Weitere Vorträge auf Fachkonferenzen fanden nach dem Bewilligungszeitraum statt und wurden daher nicht abgerechnet.

Verwendungsnachweis sonstige unmittelbare Vorhabenkosten

Zur Durchführung des Projektes wurden Lizenzen für die Software Genesis von DYNAmore käuflich erworben und den anderen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Die Lizenzen konnten zu deutlich unter marktüblichen Konditionen bezogen werden. Software-Lizenzen für LS-DYNA wurden kostenlos zur Verfügung gestellt.

II.2.4 Nachweis HAW Hamburg

Verwendungsnachweis von Personalkosten:

Für eine eingehende Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Technik der Topologieoptimierung wurde 1 AM eingesetzt. Die Verifikation der Berechnungsgüte von auf der Finite-Elemente-Methode basierenden Crash-Simulationen wurde in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern ebenfalls mit 1 AM durchgeführt. Für die Weiterentwicklung der Methode der Abstraktion von mechanischen Strukturen durch mathematische Graphen und die Umsetzung in der Software GRAMB (GRAPh based Mechanics Builder) wurden anstatt der beantragten 7 AM nur 4 AM benötigt. Die Entwicklung und Erprobung von Heuristiken für die Modifikation der Topologie von mechanischen Strukturen sowie die Umsetzung in die Software TOC (Topology Optimizer for Crash-loaded structures) wurde statt der beantragten 6 AM mit 9 AM durchgeführt. Für die automatisierte Graphen-basierte Generierung von Optimierungsmodellen wurden 3 AM aufgewendet. Die Erprobung der Methode der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung an Anwendungsbeispielen und dem industriellen Demonstrator wurde mit 5 AM durchgeführt. Hierin enthalten sind auch das Aufsetzen von Optimierungsprozeduren auf der CRAY des HLRS und das Erstellen der dafür nötigen Skripte. Die abschließende Dokumentation aller durchgeführten Arbeiten hat 1 AM benötigt.

Verwendungsnachweis Beschäftigungsentgelte

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde das Projekt von Christopher Ortmann als wissenschaftlicher Mitarbeiter bearbeitet. Zusätzlich wurde Herr Ortmann durch die studentischen Hilfskräfte Thomas Schmutte, Michael Wtorow, Marie Möbius und Tim Backes unterstützt.

Verwendungsnachweis Reisekosten

Die angefallenen Reisekosten gehen auf regelmäßige Projekttreffen und Workshops mit den Projektpartnern und assoziierten Partnern zurück. Hinzu kommen Reisekosten für projektbezogene Schulungen und für Vorträge über erreichte Forschungsergebnisse auf Konferenzen.

Verwendungsnachweis vorhabenspezifische Anschaffungen / sonstige Vorhabenkosten

Für die Arbeit am Projekt war es erforderlich zwei Softwarelizenzen und ein Fachbuch anzuschaffen.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten

II.3.1 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten asc(s)

Die im Verbundvorhaben Crash-Topo erfolgten Projektarbeiten ermöglichten die Erforschung, den Vergleich, die Kopplung und die Validierung völlig neuer Methoden im Bereich der nichtlinearen Topologieoptimierung für crashbeanspruchte Fahrzeugstrukturen. Durch die Definition der Anforderungen, die Bereitstellung von virtuellen Modellen und fachlicher Expertise wurden die Grundlagen für die softwaretechnische Umsetzung der zuvor aufgezeigten Methoden geschaffen. Für den Erfolg der Methoden ist stets die Antwortzeit ein bedeutender Faktor. Hierzu erfolgen Untersuchungen zur Reduzierung der Rechenzeiten durch Verwendung von Substrukturen. Gerade in diesem Bereich wurde großes Potential für weitere Forschungsaktivitäten identifiziert. Konkrete Planungen zu diesem Thema sind bereits am asc(s) im Gange. Die Angemessenheit der Arbeiten am asc(s) zeigt sich somit in der Erreichung der definierten Projektziele sowie der Ableitung weiterer Forschungsaktivitäten.

II.3.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten SFE

Zu Beginn des Projekts existierte kein Verfahren, die Vielfalt der Topologie-Variationen einfach zu beschreiben und auf eine sinnvolle Auswahl zu reduzieren. Mit der in SFE CONCEPT entwickelten Musterüberlagerung können die während des Projekts in Strangpressprofilen analysierten, auftretenden Strukturen aus einfachen Grundmuster erzeugt und mit wenigen Parametern beschrieben werden.

Die Verwendung dieser Technik ist in vielen Bereichen auch außerhalb des Bereichs von Strangpressprofilen (z.B. Rippen) sehr gut denkbar.

Auch die Durchgängigkeit des Prozesses zwischen den Softwares der beteiligten Partner konnte während des Projekts vielfach geprüft werden und wertvolle Erfahrung liefern. Die Ergebnisse aus den Entwicklungen der Partner können in SFE CONCEPT weiter verarbeitet werden, um diese auch in einem Gesamtfahrzeugmodell (und dessen weiterführende Variation/Optimierung) zu nutzen.

Die Angemessenheit des Projekts zeigt sich im großen Interesse der Kunden an der Prozesslösung von einem Topologie-Entwurf über das FE-Simulationsmodell bis zu den Crash-Eigenschaften. Der während des Projekts erstellte Prozess ist in dieser Art nur mit der Software SFE CONCEPT möglich.

II.3.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten DYNAmore

Zu Beginn des Projektes existierten keine industriell einsatzfähigen Verfahren zur Topologieoptimierung unter Berücksichtigung nichtlinearer Lastfälle. Durch das Projekt konnten hierfür zwei Ansätze aus dem wissenschaftlichen Umfeld eingehend untersucht werden: Die HCA-Methode und die ESL-Methode. Die während des Projekts gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Möglichkeiten und Grenzen der Methoden und die daraus entstandenen Weiterentwicklungen der Software waren notwendig, um auf dem Themengebiet nichtlineare Topologieoptimierung voranzukommen und die Software-Produkte in die industrielle Anwendung zu bringen. Die gewonnenen Erkenntnisse stärken die Wettbewerbsfähigkeit von DYNAmore auf dem Gebiet der nichtlinearen Optimierung.

Die Angemessenheit des Projektes zeigt sich im von Kunden gezeigten Interesse an der Durchführung von nichtlinearen Optimierungen mit der HCA- bzw. ESL-Methode.

II.3.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten HAW

Hamburg

Zu Beginn des Projekts existierten für die Topologieoptimierung unter Berücksichtigung von Crash-Lastfällen und der Verwendung beliebiger Optimierungsfunktionale keine etablierten Lösungen. Aus diesem Grund bestand die Notwendigkeit der Verfolgung neuer Optimierungsansätze. In dem Forschungsprojekt *DySOF (Dynamische Simulation und Optimierung von Fluggastsitzen)* wurde für die Berechnung und die Optimierung von nichtlinear dynamisch belasteten Fluggastsitzen die Graphensyntax und Grundlagen der aktuell verwendeten Programmsysteme für die Abstraktion von mechanischen Strukturen durch mathematische Graphen entwickelt. Auch erste Ansätze für die Änderung der Topologie von zu optimierenden Strukturen durch mathematische Handlungsvorschriften (Heuristiken) wurden erdacht.

Diese Ideen wurden in den Projekt-Arbeitsinhalten der HAW Hamburg weiterentwickelt zu einem Werkzeug für die automatisierte Topologieoptimierung, Gestaltoptimierung und Dimensionierung von crashbelasteten Strukturen. Die dafür notwendigen Programmsysteme sind in der Programmiersprache *JAVA* umgesetzt wurden und besitzen Schnittstellen zu leistungsfähigen, kommerziellen Programmsystemen wie *LS-OPT®* und *SFE CONCEPT®*, um Teilaufgaben der Optimierungsprozedur wie z.B. die Gestaltoptimierung in der inneren Optimierungsschleife dieses Programmsystem übertragen zu können.

II.4 Verwertbarkeit

II.4.1 Verwertung asc(s)

Der durch die Projektarbeiten erfolgte Kompetenzaufbau stärkt die Ziele des asc(s weitere (Förder-) Projekte im Projektcluster (2) Fahrzeugstruktur zu akquirieren. Dies soll im Verbund mit den bereits bestehenden, aber auch mit neuen Mitgliedsfirmen (u.a. KMUs) im Netzwerk des asc(s erfolgen. Der Transfer von wissenschaftlichen Ansätzen in die Industrie wird im Sinne der Vereinsziele des asc(s beschleunigt. Arbeitsplätze können somit gesichert und geschaffen

werden. Die wissenschaftliche Konkurrenzfähigkeit wird gestärkt. Detailliertere Angaben zu der geplanten Verwertung der Ergebnisse finden sich im Erfolgskontrollbericht.

II.4.2 Verwertung SFE

SFE hat trotz des Status eines KMUs in Deutschland vor allem mit den Software Produkten SFE CONCEPT und SFE AKUSMOD eine weltweite Verbreitung. Die Anwendung unserer Softwareprodukte wird durch lokale Dienstleistungen unserer Tochterorganisationen in China, unseren Partnern in Nordamerika und durch direkte Distributoren in Asien unterstützt. Nach wie vor ist aber der Direktvertrieb entscheidend. Diese Vertriebsform kann heute über moderne Kommunikationsformen (z.B. webex) gezielt unterstützt werden. Trotzdem ist der direkte Kundenkontakt – das face-to-face Gespräch – sehr wichtig. Üblicherweise erfolgt die Kontaktaufnahme und Kontaktpflege über Präsentationen vor Ort, Teilnahme an entsprechenden Kongressen sowie Veröffentlichungen mit Industriepartnern.

Dieser „direkte“ Kontakt führt unmittelbar zu „vertieften“ Fachgesprächen mit den Fachabteilungen. Waren noch vor einigen Jahren die NVH-relevanten Fragestellungen dominant, so ist heute die Auslegung von Fahrzeugen hinsichtlich ihrer Crash-Performance weitestgehend dominierend. Die Frage nach der Topologie-Auslegung bzw. Topologie-Optimierung ist allgegenwärtig.

Die bisherigen Erfolge in diesem geförderten Forschungsthema unter der o.g. Fragestellung sind prototypisch in Form von Funktionserweiterungen greifbar. Dies betrifft seitens der KMUs sowohl die Firma SFE als auch die Firma DYNAmore. Glücklicherweise sind die Softwareprodukte beider Firmen bei vielen Kunden weltweit im Einsatz. Da der Standort Deutschland, speziell was die Automobiltechnik betrifft, nach wie vor ein großes Ansehen genießt, ist die „Neugierde“ und das „Interesse“ an von Deutschland geförderten Forschungen und deren direkter Praxisumsetzung für Kunden außerhalb aber auch innerhalb Deutschlands von großer Wichtigkeit. Solche Projekte haben ihren Wert in der direkten Verzahnung von Forschung und praxistauglicher Umsetzung. Es ist jedoch zwingend erforderlich, die Umsetzung an praxisrelevanten, bedarfsgerechten Anwendungen aufzeigen zu können. Die Zeitspanne zwischen „erster“ Funktionsdarstellung anhand praxiswaardiger Beispiele und einer möglichen Lizenzierung der Zusatzfunktionalitäten beträgt erfahrungsgemäß bis zu 2 Jahre. In dieser

Zeitspanne werden üblicherweise so genannte „Benchmarks“ gefahren. Können bei diesen Benchmarks die funktionalen Vorteile gegenüber Konkurrenztechnologien nachgewiesen werden, sind die Sicherung des bestehenden Marktes und ggf. auch die Schaffung neuer Märkte sehr wahrscheinlich. Das bedeutet z.B. für SFE die Aussicht auf mehrere Lizenzverkäufe an neue Kunden bzw. neue Abteilungen bei bestehenden Kunden und damit natürlich die einhergehende Steigerung von Ertrag und Umsatz als auch die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit.

In der Vergangenheit mussten wir (SFE) oft erleben, dass wegweisende Forschungen in Deutschland ihre software-technische Umsetzung im Ausland hatten. Das lässt sich an vielen Beispielen belegen (z.B. SEA).

Wenn die Partner und vor allem die am Projekt beteiligten KMU's (SFE & Dynamore) die Chance erhalten, praxisrelevante Umsetzungen der neuen Funktionalitäten weltweit als Beweis der geglückten Verbindung von Forschung und umgesetzter Funktion nachweisen zu können, wird sich dies in der Verbesserung der Wettbewerbssituation der beiden Firmen niederschlagen, nicht zuletzt auch für den Technologiestandort Deutschland. Das wäre ein direkter Erfolg der Förderung.

Innerbetrieblich hilft das geförderte Projekt im Austausch mit den Partnern, die wissenschaftliche Konkurrenzfähigkeit zu fördern und die Kompetenz nicht nur zu wahren, sondern auch zu erweitern.

SFE wird die Technik der generischen Mustererstellung und Musterüberlagerung zur Findung von Ausgangs-Topologien auf die Auslegung flächenartiger Guss-Strukturen im Leichtbau (auch außerhalb der Anwendung im Automobilbereich) übertragen. Somit ist eine Umsetzung in angrenzende Wissensgebiete möglich. SFE plant, diese Erweiterung mit den Software-Produkten von Dynamore und anderen kommerziellen Produkten der Crash-Analyse und Optimierung zu verknüpfen.

SFE ist bereits in Kontakt mit OEMs zur Konkretisierung von Folgeprojekten.

II.4.3 Verwertung DYNAmore

DYNAmore hat in den letzten 10 Jahren eine ausgezeichnete Expertise im Bereich numerische Optimierung aufgebaut, was zu etlichen Arbeitsplätzen geführt hat. Um diese Expertise zu sichern, ist es wichtig neue Methoden zu entwickeln und innovative Ansätze zu verfolgen. Die in diesem Projekt bisher getätigten Untersuchungen und der fachliche Austausch mit den Industriepartnern haben zu vielen Verbesserungen in bestehenden Produkten sowie zu funktionellen Neuentwicklungen geführt.

Wir konnten feststellen, dass in der Automobilbranche großes Interesse an kommerziellen Softwarelösungen zur nichtlinearen Topologieoptimierung besteht. Mit den beiden im Rahmen des Projektes untersuchten und weiterentwickelten Methoden HCA und ESLM können wir in diesen neuen Absatzmarkt einsteigen.

Zum anderen stellten wir auch ein Kundeninteresse an kommerziellen Softwarelösungen fest, die eine geschlossenen Prozesskette zur Topologie- und anschließenden Formoptimierung inklusiv automatisierter Modellgenerierung bietet.

Um diese Prozesskette zu kommerzialisieren, wird eine enge Zusammenarbeit der Projektpartner stattfinden. Die Verzahnung mit wissenschaftlichen Instituten innerhalb dieses Forschungsvorhabens wirkt sich sehr positiv auf unsere methodische Kompetenzerweiterung aus. Ein weiterer Aspekt ist die positive Wahrnehmung unserer Kunden hinsichtlich einer fundierten Grundlagenabsicherung durch die Zusammenarbeit mit Hochschulinstituten. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse aus dem Projekt schaffen zusätzliches Know-How in unserem Unternehmen und steigern unsere wissenschaftliche Konkurrenzfähigkeit. Insbesondere im Bereich Topologieoptimierung wurde im bisherigen Projektverlauf viel Erfahrung gesammelt, die in Zukunft gewinnbringend eingesetzt werden kann. Wir sind zuversichtlich, dass die Methoden HCA und ESL für viele Problemklassen der nichtlinearen Topologieoptimierung zielführend eingesetzt werden können. Diese zwei Methoden bieten neben der von unserem Programmpaket LS-OPT unterstützten „Response Surface Methode“ zwei weitere Ansätze, die die Möglichkeiten der Optimierungsanwender bei Nichtlinearität erweitern.

II.4.4 Verwertung HAW Hamburg

Die HAW Hamburg verfolgt als Hochschule keinerlei Pläne für eine kommerzielle Verwertung der Projektergebnisse. Die Kernaspekte der Verwertung der Projektergebnisse aus Sicht der HAW Hamburg sind daher wissenschaftliche.

Eine Dissertation welche sich inhaltlich mit der Methode der *Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung* beschäftigt, wird von Herrn Ortmann voraussichtlich im Mai 2014 fertig gestellt sein. Die Arbeit an der Methode wird von Prof. Dr. Schumacher und Herrn Ortmann an der Bergischen Universität Wuppertal fortgesetzt und soll u.a. durch weitere Promotionen und studentische Abschlussarbeiten weiterentwickelt werden. Die Methode der *Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung* wird hierdurch auch zur Heranbildung von wissenschaftlichem Nachwuchs verwendet werden. Das in dem Forschungsprojekt erlangte Wissen wird durch Konferenzbeiträge und Artikel in Fachzeitschriften der Wissenschaftsgemeinschaft und anderen potentiellen Nutzergruppen zugänglich gemacht. Zusätzlich erfolgt durch ein nachfolgendes Kooperationsprojekt ein direkter Transfer des Wissens zu *OEMs* der Automobilindustrie.

Ein weiteres Kernziel ist die Erhöhung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit des Forschungsstandorts Deutschland durch die Entwicklung einer Optimierungsmethode, welche für die Topologieoptimierung von crashbelasteten Strukturen eingesetzt werden kann. Alle bisherigen relevanten Entwicklungen auf diesem Gebiet stammen aus den USA oder aus Asien. Durch die während der Projektlaufzeit getätigten Veröffentlichungen und zukünftige Veröffentlichungen soll die wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit verbessert werden.

Detailliertere Angaben zu der geplanten Verwertung der Ergebnisse finden sich im Anhang III Erfolgskontrollbericht.

II.5 Fortschritte bei anderen Stellen

Projektrelevante Ergebnisse von dritter Seite wurden während der Projektlaufzeit kontinuierlich beobachtet. Relevante Ergebnisse sind nicht identifiziert worden.

II.6 Im Wesentlichen verwendete Literatur

Bendsøe MP, Sigmund O (2003) *Topology Optimization – Theory, Methods and Applications*. Springer Verlag, Berlin.

Bendsøe MP, Kikuchi N (1988) Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method. *Comput Methods Appl Mech Eng* 71: 197-224

Burks, A.W. (1970) *Essays on Cellular Automata*, chapter: von Neumanns self-reproducing automata, p. 3-64. University of Illinois Press.

Diestel R (2010) *Graph Theory*. Springer-Verlag, Heidelberg

Duddeck F (2008) Multidisciplinary optimization of car bodies. *Struct Multidisc Optim* 35: 375-389

Duddeck F und Zimmer H (2012): *New Achievements on Implicit Parameterisation Techniques for Combined Shape and Topology Optimization for Crashworthiness based on SFE CONCEPT*. ICRAASH 2012, Milan, Italy.

Duddeck F und Zimmer H (2012): *Modular Car Body Design and Optimization by an Implicit Parameterization Technique via SFE CONCEPT*. FISITA 2012, Beijing, China.

Eschenauer H, Kobelev V, Schumacher A (1994) Bubble method for topology and shape optimization of structures. *J Struct Optim* 8: 42-51

Hallquist J (2007): „LS-DYNA Keyword User's Manual – Version 971“, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, Kalifornien

Helm D, Huf A, Zimmer H, Kondziella R (2012): *Anforderungen in der Frühen Phasen der Gesamtfahrzeugauslegung*. SIMVEC 2012 - Berechnung, Simulation und Erprobung im Fahrzeugbau, Baden-Baden, Germany

Hilmann, J (2009): *On the development of a process chain for structural optimization in vehicle passive safety*. Dissertation TU Berlin.

Hunkeler S , Duddeck F , Zimmer H und Rayamajhi M (2010): Robustness Analysis and Shape Optimisation for Crashworthiness of Passenger Cars with SFE CONCEPT. 8th ASMO-UK Conf. Queen Mary University of London, UK.

Kurz M, Droeder A, Hillebrand A, Zimmer H, Prabhu M, Gross-Thebing A (2012): *Automatisierter Prozessablauf zur Topologie- und Formoptimierung von Tragstrukturen für Batteriemodule im Fahrzeugentwurfsprozess*. SIMVEC 2012 - Berechnung, Simulation und Erprobung im Fahrzeugbau, Baden-Baden, Germany

Mayer RR, Kikuchi N, Scott RA (1996) Application of topological optimization techniques to structural crashworthiness. Int J Numer Methods Eng 39: 1383-1403

Norato JA, Bendsøe MP, Haber RB, Tortorelli DA (2007) A topological derivative method for topology optimization. Struct Multidisc Optim 33: 375-386

Olschinka C, Schumacher A (2008) Graph based topology optimization of crashworthiness structures. PAMM Proc Applied Math Mech 8(1): 10029-10032

Ortmann C, Schumacher A (2012) Methodik der Graphen- und heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Auslegung von crashbelasteten Fahrzeugstrukturen. Beitrag auf der SIMVEC Berechnung, Simulation und Erprobung im Fahrzeugbau 2012, 20.-21. November 2012, Baden-Baden, Deutschland

Ortmann C, Schumacher A (2013) Graph and heuristic based topology optimization of crash loaded structures. Erscheint in: Struct Multidisc Optim, DOI 10.1007/s00158-012-0872-7

Park GJ (2011) Technical Overview of the Equivalent Static Loads Method for Non-Linear Static Response Structural Optimization. Struct Multidisc Optim 43: 319-337

Patel NM, Kang BS, Renaud, JE, Tovar A (2009) Crashworthiness Design Using Topology Optimization. *J Mech Des* 131: 061013.1-061013.12

Patel NM (2007) Crashworthiness Design using Topology Optimization. Dissertation, University of Notre Dame, Indiana, US.

Pedersen CBW (2004) Crashworthiness Design of transient frame structures using topology optimization. *Comput Methods Appl Mech Eng* 193: 653-678

Schelke E (2009a): *CAE2015 - Current Status, Directions and Challenges*. NAFEMS World Congress 2009, June 16th – 19th, Crete (Greece).

Schumacher A (2005a) Optimierung mechanischer Strukturen – Grundlagen und industrielle Anwendungen. Springer-Verlag, Heidelberg

Schumacher A (2005b) Parameter-based topology optimization for crashworthiness structures. Proceeding of the 6th WCSMO, Rio de Janeiro, Brazil, May 30 - June 3

Schumacher A, Olschinka C (2008) Robust Design considering highly nonlinear structural behavior. *Struct Multidisc Optim* 35: 263-272

Schumacher A, Ortman C (2011) Topology Optimization - Reseach State of the Art. Proceeding of the Automotive CAE Grand Challenge 2011, Hanau, Deutschland, 19 - 20 April

Schumacher A, Ortman C (2012a) Regelbasiertes Verfahren zur Topologieoptimierung von Profilquerschnitten für Crashlastfälle. Beitrag auf den Karosseriebautagen Hamburg 2012 12. Internationale ATZ-Fachtagung, Hamburg, Deutschland, 10.-11. Mai

Schumacher A, Ortman C (2012b) Crashtoptimierung - Vergleich Intuition und Algorithmus. *Mobiles Fachzeitschrift für Konstrukteure* 37

Schumacher A, Ortmann C (2012c) Topology optimization of crash structures - creativity versus computer-based algorithms. Beitrag auf dem 11. LS-DYNA Forum, Ulm, Deutschland, 9.-10. Oktober

Soto CA (2004) Structural topology optimization for crashworthiness. Int J Crash 9(3) : 277-283

Volz K, Dirschmid F und Duddeck F (2006): *Body-in-White Crash Optimization in the Early Phase of Product Development*. In: Numerical Analysis and Simulation in Vehicle Engineering, VDI Conf., Würzburg.

Volz K , Dirschmid F, Stryczek R und Zimmer H (2007): *Optimization of Topology and Shape for Crashworthiness in Vehicle Product Development*. Int. Automotive Body Congress (IABC), June 2007, Berlin.

Yang RJ, Gu L, Soto CA, Li G, Tyan T (2004) Developments and Applications of Structural Optimization and Robustness Methods in Vehicle Impacts. Proceeding of the ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, California, USA, November 13 – 19

Zimmer H, Prabhuwaingankar M und Duddeck F (2009): *Topology- and geometry-based structure optimization using implicit parametric models and LS-OPT*. 7th European LS-DYNA Conference, 14th-15th May 2009, Salzburg.

Zimmer H, (2012): *Zielgerichtete Strukturvariation zur Verringerung des Schalldruckpegels in Fahrzeugen*. NAFEMS 2012- Schallentstehung und -ausbreitung in Festkörpern und Fluiden Moderne Analysemethoden in der Akustik, Wiesbaden, Germany

Zimmer H und Duddeck F (2012): *Vibro-acoustic optimization using discrete and continuous design variables*. FISITA 2012, Beijing, China.

Zimmer H (2013): Technical Keynote: *Optimization in Complex Constraint Situations for the Early Vehicle Design Phase*. SAE 2013 World Congress & Exhibition, Detroit, MI, USA

Zimmer H (2013): *A Parametric and Modular Approach Towards the Simulation-Driven Seamless Design Process*, NAFEMS 2013 - World Congress, Salzburg, Austria.

Zimmermann M, Wölfle F, Zimmer H, Schäfer M, and Duddeck F (2012): *Optimierung von Subsystemen der Fahrzeugstruktur für den Front-Crash*. SIMVEC 2012 - Berechnung, Simulation und Erprobung im Fahrzeugbau, Baden-Baden, Germany

II.7 Veröffentlichungen

Schumacher A, Ortman C (2011) Topology Optimization - Reseach State of the Art. Beitrag auf der automotive CAE Grand Challenge 2011, 19.-20. April 2011, Hanau, Deutschland

Schumacher A, Ortman C (2012) Regelbasiertes Verfahren zur Topologieoptimierung von Profilquerschnitten für Crashlastfälle. Beitrag auf den Karosseriebautagen Hamburg 2012 12. Internationale ATZ-Fachtagung, 10.-11. Mai 2012, Hamburg, Deutschland

Schumacher A, Ortman C (2012) Crashtoptimierung - Vergleich Intuition und Algorithmus. Mobiles Fachzeitschrift für Konstrukteure 37

Schumacher A, Ortman C (2012) Topology optimization of crash structures - creativity versus computer-based algorithms. Beitrag auf dem 11. LS-DYNA Forum, 09.-10. Oktober 2012, Ulm, Deutschland

Ortman C, Schumacher A (2012) Methodik der Graphen- und heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Auslegung von crashbelasteten Fahrzeugstrukturen. Beitrag auf der SIMVEC Berechnung, Simulation und Erprobung im Fahrzeugbau 2012, 20.-21. November 2012, Baden-Baden, Deutschland

Ortman C, Schumacher A (2013) Graph and heuristic based topology optimization of crash loaded structures. Erscheint in: Struct Multidisc Optim, DOI 10.1007/s00158-012-0872-7

Witowski K., Erhart A., Schumacher P., Müllerschön H. (2012) Topology Optimization for Crash. Conference Proceedings of the 12th international LS-DYNA User Conference, 3.-5. Juni 2012, Detroit.

Erhart A., Schumacher P., Müllerschön H. (2012) Topologie Optimierung mit LS-TaSCTM und GENESIS/ESL[®] für Crash-Lastfälle . Beitrag auf dem 11. LS-DYNA Forum, 9.-10. Oktober 2012, Ulm.